

DESARROLLO DE UN MODELO PREDICTIVO COMPUTACIONAL PARA EL
DIAGNÓSTICO DE LA CONDICIÓN DE BOMBAS CENTRÍFUGAS

FRANCISCO JAVIER BOTERO HERRERA

UNIVERSIDAD EAFIT
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
ÁREA DE MANTENIMIENTO
MEDELLÍN
2005

DESARROLLO DE UN MODELO PREDICTIVO COMPUTACIONAL PARA EL
DIAGNÓSTICO DE LA CONDICIÓN DE BOMBAS CENTRÍFUGAS

FRANCISCO JAVIER BOTERO HERRERA

Tesis de maestría para optar al título de
Master en Ingeniería Área Mecánica

Asesor Principal
Master Leonel Francisco Castañeda Heredia

UNIVERSIDAD EAFIT
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
ÁREA DE MANTENIMIENTO
MEDELLÍN
2005

A la memoria de mi padre

Javier Botero

AGRADECIMIENTOS

El autor expresa sus agradecimientos a:

Dios.

A la Universidad EAFIT, al grupo GEMI y a todas las personas que hicieron su aporte, por haber hecho posible la ejecución de la investigación.

CONTENIDO

pág.

INTRODUCCIÓN	14
1.1 HIPÓTESIS.....	17
NOMENCLATURA Y ABREVIATURAS	18
2 CONCEPTUALIZACIÓN DEL DIAGNÓSTICO TÉCNICO.....	20
2.1 ESTADO TÉCNICO DE LAS BOMBAS CENTRÍFUGAS	21
3 SISTEMA DE BOMBEO EXPERIMENTAL.....	25
3.1 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA	25
3.1.1 Variador de velocidad.	26
3.1.2 Válvula automática.	27
3.1.3 Pinza amperimétrica.	27
3.1.4 Lámpara estroboscópica.....	28
3.1.5 Transductores de presión	29
3.1.5.1 Transductores de presión relativa	30
3.1.5.2 Transductores de presión absoluta	30
3.1.6 Acelerómetros.....	31
3.1.7 Medidor de flujo y sensor óptico	32
3.1.8 Bomba centrífuga	32
3.1.9 Motor eléctrico	33
3.1.10 Control y adquisición de datos.....	33
3.2 CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA DE BOMBEO EXPERIMENTAL	35
3.2.1 Curva característica del funcionamiento de la bomba.	35
3.2.2 Curva característica de la eficiencia de la bomba.....	36
3.2.3 Potencia hidráulica entregada por la bomba.....	37

3.2.3.1	Peso específico de un fluido.....	38
3.2.3.2	Caudal volumétrico en una tubería.....	38
3.2.4	Potencia eléctrica consumida por el motor de la bomba.....	38
3.2.5	Curva característica del sistema de bombeo	39
3.2.5.1	Pérdidas de carga en un sistema de bombeo	40
3.2.5.1.1	Pérdidas primarias de carga.....	42
3.2.5.1.1.3	Viscosidad cinemática de un fluido.....	42
3.2.5.1.1.4	Viscosidad dinámica de un fluido	43
3.2.5.1.2	Pérdidas secundarias de carga	43
3.2.6	Curva característica de la cabeza neta de succión positiva disponible.....	44
3.2.6.1	Cabeza neta de succión positiva requerida ($NPSH_R$).....	45
3.2.6.2	Variación del $NPSH_R$ con la velocidad de giro de la bomba.....	45
3.2.7	Punto de operación de un sistema de bombeo.....	46
3.3	EXPERIMENTACIÓN: CURVAS CARACTERÍSTICAS REALES.....	47
4	MODULO DE SEÑALES.....	50
4.1	INSTRUMENTACIÓN	50
4.2	PARÁMETROS DE CAPTURA Y DIGITALIZACIÓN DE LAS SEÑALES	50
4.3	SELECCIÓN DE LOS PUNTOS DE MEDICIÓN	52
4.3.1	Algoritmo.....	53
4.4	EXPERIMENTACIÓN	54
5	MÓDULO DE PROCESAMIENTO DE SEÑAL	57
5.1	ESTIMADORES VIBROACÚSTICOS.....	57
5.2	EXPERIMENTACIÓN	63
5.2.1	Buen estado.....	63
5.2.2	Mal estado	63
6	MÓDULO DE VIGILANCIA DE LA CONDICIÓN	65
6.1	EXPERIMENTACIÓN	67
7	MÓDULO DE LA EVALUACIÓN DE ESTADO	68

7.1	MODELO REGRESIVO	69
7.2	EXPERIMENTO PASIVO	70
7.3	VALOR LÍMITE	72
7.3.1	Método que considera el nivel admisible de reparaciones innecesarias.....	72
7.3.2	Método apoyado en el valor del parámetro de diagnóstico	73
7.3.3	Método apoyado en la distribución del parámetro de diagnóstico.....	73
7.4	MODELO PROBABILISTICO	73
7.5	EXPERIMENTACIÓN	76
7.5.1	Buen estado.....	76
7.5.2	Mal estado	77
7.5.3	Vida del sistema	77
7.5.4	Distribución probabilística y valores límite de los estimadores según el estado técnico.....	78
7.5.4.1	Distribuciones en la carcasa de la bomba	78
7.5.4.2	Valores límite para parámetros de salida en la carcasa de la bomba.....	81
7.5.4.3	Probabilidades para la toma de decisiones con respecto a los parámetros de salida – Punto de medición bomba.....	82
7.5.4.4	Distribuciones en el motor	83
7.5.4.5	Valores límite para parámetros de salida en el motor	86
7.5.4.6	Probabilidades para la toma de decisiones con respecto a los parámetros de salida – Punto de medición motor.....	86
7.5.5	Reducción de información (Experimento pasivo).....	87
7.5.6	Modelo regresivo	89
8	MÓDULO DE PRONÓSTICO	93
8.1	CONCEPTOS PARA DETERMINAR EL PRONÓSTICO DEL ESTADO TÉCNICO DE BOMBAS CENTRÍFUGAS	93
8.1.1	Métodos para definir el conjunto de parámetros de	

diagnóstico para el pronóstico	98
8.1.1.1 Método de sensibilidad del parámetro al cambio de estado, $x_{1,1}$	99
8.1.1.2 Método del cambio relativo del parámetro con el estado técnico, $x_{1,2}$	99
8.1.1.3 Método de la capacidad de información del parámetro de diagnóstico, $x_{1,3}$	100
8.1.1.4 Método de la variación del parámetro, $x_{1,4}$	101
8.1.2 Tarea de optimización para determinar el conjunto de parámetros de diagnóstico. La tarea para determinar el conjunto de parámetros de diagnóstico va a ser:	102
8.1.3 Métodos de pronóstico	105
8.1.3.1 Método del parámetro general, $x_{2,1}$	105
8.1.3.2 Método de la función de regresión $x_{2,2}$	107
8.1.3.3 Método de Brown-Mayer de orden 1, $x_{2,3}$	109
8.1.3.4 Método de Brown-Mayer de orden 2, $x_{2,3}$	111
8.1.4 Tarea de optimización del método de pronóstico	113
8.1.5 Algoritmo para determinar el pronóstico óptimo PET^o	116
8.2 EXPERIMENTACIÓN	117
8.2.1 Definición del número de parámetros optimo para el pronóstico.	117
8.2.2 Definición del pronóstico óptimo del estado técnico PET^o	120
9 CONCLUSIONES	123
BIBLIOGRAFÍA	125
REFERENCIAS TOMADAS DE INTERNET	129

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Modelo de diagnóstico.....	20
Figura 2. Parámetros de salida para la bomba centrífuga	23
Figura 3. Sistema de bombeo experimental.	25
Figura 4. Variador de velocidad Siemens-Micromaster 440 de 3 hp.....	27
Figura 5. Válvula del sistema de bombeo experimental.....	27
Figura 6. Pinza amperimétrica marca Fluke, referencia i200s	28
Figura 7. Lámpara estroboscópica marca extech, modelo 461830.....	29
Figura 8. Transductor de presión relativa marca Danfoss MBS 3000.....	30
Figura 9. Transductor de presión absoluta, marca Siemens SITRANS P.....	31
Figura 10. Acelerómetro marca Kistler, referencia 8704B50M1	31
Figura 11. Medidor de flujo marca Elster, referencia H4000.....	32
Figura 12. Conjunto motor-bomba del banco experimental	33
Figura 13. Configuración del sistema de control y adquisición de datos del banco experimental	34
Figura 14. Presión de vapor del agua en función de la temperatura.....	45
Figura 15. Procedimiento para la construcción de las curvas características del sistema de bombeo.	47
Figura 16. Curvas características del sistema de bombeo experimental.	48
Figura 17. Sistema coordenado y puntos para la medición de vibraciones	54
Figura 18. Modelo regresivo de diagnóstico.	69
Figura 19. Decisión del estado técnico	75
Figura 20. Aparición del fenómeno de cavitación.	78
Figura 21. Reducción de la información.....	88
Figura 22. Comportamiento de cabeza (H_B) y eficiencia.....	90

Figura 23. Resultados de la regresión	92
Figura 24. Niveles de alerta y alarma.	97
Figura 25. Interpretación de la tarea 8.1.2.	105
Figura 26. Interpretación de la tarea 8.1.4.	116
Figura 27. Diagrama para determinar el PET°.	117
Figura 28. Interpretación gráfica de los resultados de la tarea 8.1.2.	119
Figura 29. Representación gráfica de los resultados de los pronósticos.	121
Figura 30. Interpretación gráfica de los resultados de la tarea 8.1.4	122

LISTA DE TABLAS

pág.

Tabla 1. Frecuencias de vibración que pueden encontrarse operando el sistema a 1709 rpm.....	51
Tabla 2. Coherencia entre puntos de medición	55
Tabla 3. Similitud de información entre puntos de medición.....	56
Tabla 4. Resumen de las Características de la señal en amplitud.....	58
Tabla 5. Estimadores vibro-acústicos: buen estado - mal estado	64
Tabla 6. Límites del nivel de vibración de la bomba del banco experimental según la norma VDI 2056	65
Tabla 7. Parámetros de salida y valores límite seleccionados para la evaluación de estado – Punto de medición bomba.....	82
Tabla 8. Probabilidades para toma de decisiones. Punto de medición bomba.....	82
Tabla 9. Parámetros de salida y valores límite seleccionados para la evaluación de estado – Punto de medición motor.....	86
Tabla 10. Probabilidades para toma de decisiones. Punto de medición motor.....	87
Tabla 11. Resultados del experimento pasivo.	89
Tabla 12. Valores de R^2 para los parámetros de diagnóstico.	89
Tabla 13. Resultados de la regresión	91
Tabla 14. Resultados de la tarea 8.1.2.	119
Tabla 15. Resultados de la tarea 8.1.4	122

INTRODUCCIÓN

Un sistema de bombeo puede definirse como el conjunto de elementos capaces de adicionar energía a un fluido para trasladarlo de un punto a otro; la bomba es uno de sus principales componentes, y su principal función es transformar la energía mecánica en energía hidráulica.

Una bomba es una turbo-máquina generadora para líquidos utilizada para transformar la energía mecánica en energía hidráulica. Es una máquina de diversas aplicaciones a nivel industrial, ya que pueden ser empleadas para bombear toda clase de líquidos, (agua, aceites de lubricación, combustibles ácidos, líquidos alimenticios, cerveza, leche, etc.), éste grupo constituyen el grupo importante de las bombas sanitarias. También se emplean las bombas para bombear los líquidos espesos con sólidos en suspensión, como pastas de papel, melazas, fangos, desperdicios, etc.

En el medio industrial es común encontrar sistemas de bombeo que trabajan en estados inaceptables debido a una serie de problemas que incluso, existen desde el momento mismo del montaje. En ocasiones, los operadores conviven con algunos de estos problemas porque se desconoce su importancia o porque el proceso para detectar su causa puede ser complicado, costoso y dispendioso.

A nivel comercial se prestan servicios de mantenimiento predictivo que centran su atención y análisis al comportamiento generalmente, de una variable, y no a la relación que puede existir entre la variación de las variables mínimas que pueden

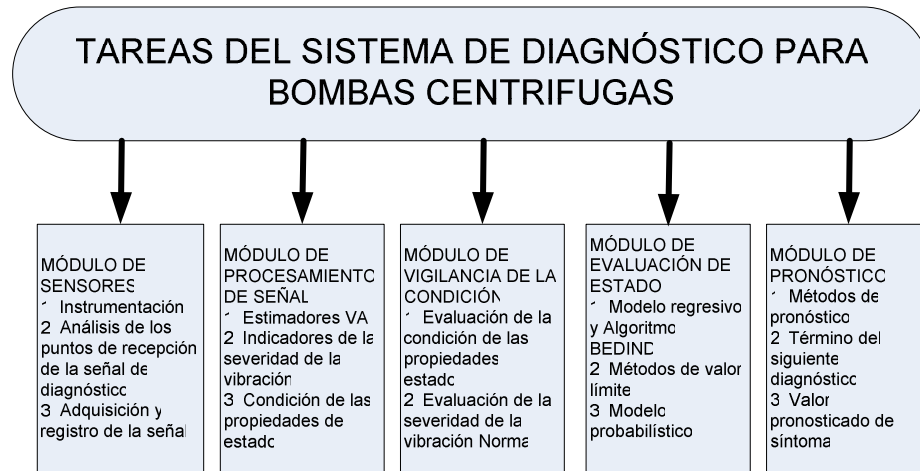
establecer y describir el estado de un sistema de bombeo. Este es el caso de la medición y análisis de las vibraciones mecánicas, que por si solas son un buen punto de partida para el mantenimiento predictivo, pero que en un sistema de bombeo, esta técnica puede arrojar resultados ambiguos si no se complementa con la medición y análisis de otras variables mecánicas.

La globalización exige a las empresas optimizar sus procesos para obtener el máximo rendimiento de sus recursos. Una máquina trabajando por fuera de sus condiciones de diseño o en estados inaceptables, es una máquina que va a estar consumiendo más energía de la necesaria para desarrollar su función. En un sistema de bombeo es posible entrar en estados inaceptables de operación por una mala selección de los componentes, por mal montaje, por un manejo imprudente, por un mantenimiento deficiente, entre otros. Si estos problemas no son detectados a tiempo, el consumo de energía demandado por el equipo se verá incrementado, y la vida útil de sus componentes reducida. Este gasto injustificado en energía y repuestos, no permiten el pleno rendimiento de una empresa en un escenario mundial.

La metodología de diagnóstico técnico que se desarrolla en la investigación tiene la flexibilidad de acomodarse a cualquier sistema de bombeo que utilice bombas centrífugas y permite adaptarse a otros sistemas técnicos.

El diagnóstico técnico es la rama de la ingeniería que se encarga de estudiar el estado técnico: actual y futuro, de los sistemas de ingeniería, identificando también la causa-raíz (Génesis) de estos estados. Un diagnóstico completo debe definir el estado actual de la máquina, la causa de este estado (génesis), y también en el horizonte futuro el cambio de este estado (prognosis). Establecer metodologías para desarrollar las tareas de las que se encarga el diagnóstico, permite emitir juicios con mayor certeza sobre los estados mencionados de un sistema técnico.

La metodología se desarrolla para ejecutar las tareas del diagnóstico en un sistema de bombeo, sin embargo, sus procedimientos se validan en un banco experimental instalado en el laboratorio de Hidráulica de la Universidad EAFIT. Para el desarrollo de los algoritmos, y procedimientos computacionales, se desarrollaron funciones que facilitan las tareas de recolección de datos, procesamiento y presentación.



El modelo propuesto consta de cinco módulos, cada uno de los cuales se desarrolla en un capítulo independiente, aunque los resultados de las experimentaciones se utilicen en varios capítulos, y no necesariamente en que fue obtenido. Los capítulos adicionales a los módulos del modelo de diagnóstico, son módulos necesarios para explicar, sustentar y complementar el conocimiento del modelo o del objeto de estudio.

Como conclusión de la exhaustiva revisión del estado del arte con respecto al tema de pronósticos del estado técnico de sistemas de ingeniería, se determinó que para abordar este tema es necesario estudiar los procedimientos del diagnóstico de sistemas técnicos. Por esta razón parte del informe se dedica a este aspecto.

El autor considera importante resaltar que dado al tema de la investigación, diagnósticos basados en el estado técnico de máquinas, y luego de varios intentos poco exitosos en la búsqueda de literatura en lengua castellana, un gran porcentaje de los planteamientos propuestos en la tesis se fundamentan en literatura extranjera, originaria, principalmente de institutos alemanes y polacos.

El presente documento además de constituirse como sustento la tesis de maestría del autor, representa también el informe de investigación del proyecto “*Desarrollo de Un Modelo Predictivo Computacional para el Diagnóstico de la Condición de Bombas Centrífugas*” desarrollado por la línea de Vibraciones y Monitoreo de Máquinas del Grupo de Estudios en Mantenimiento Industrial – GEMI reconocido por COLCIENCIAS.

Al final del informe se incluyen anexos que contienen información relacionada con la investigación. En el anexo A se encuentra la propuesta; en el anexo B se listan los estudiantes de pregrado que participaron en el proyecto; en el anexo C se incluyen los informes de investigación; en el anexo D se presentan los productos de la investigación y en el anexo E, los conceptos de evaluación del doctor Gustavo Villegas profesor de tiempo completo del departamento de Ingeniería Mecánica área mantenimiento de la universidad EAFIT y prof. dr. hab ing. Bogdan Zoltowski, director del Instituto de Diagnóstico Técnico en Polonia.

1.1 HIPÓTESIS

El diagnóstico técnico como ciencia permite evaluar el estado técnico futuro de un sistema de bombeo.

NOMENCLATURA Y ABREVIATURAS

A :	Área de una sección transversal del tubo [m^2]
A_0 :	Aceleración RMS de la aceleración de la vibración [m/s^2].
c :	Velocidad media del fluido normal a la sección considerada [m/s].
c_E :	Velocidad del fluido en la entrada de la bomba [m/s]
c^{**} :	Punto ideal para seleccionar los parámetros óptimos de diagnóstico.
$\cos(\phi)$:	Factor de potencia del motor [0,83]
D :	Diámetro de la tubería [m]
d^{**} :	Punto óptimo para seleccionar el pronóstico óptimo.
f :	Factor de fricción de la tubería [adimensional]
f_p :	Frecuencia del paso de alabes [Hz].
f_v :	Frecuencia de la vibración [Hz]
g :	Aceleración de la gravedad [$9,8 m/s^2$].
$P_{xx}(f)$:	Espectro cruzado de potencia de la señal “x-x” [adimensional].
$P_{xy}(f)$:	Espectro cruzado de potencia entre dos señales “x” e “y” [adimensional].
$P_{yy}(f)$:	Espectro cruzado de potencia de la señal “y-y” [adimensional].
H_B :	Cabeza de bomba. Altura total entregada por la bomba al fluido [mca].
H_{rp} :	Pérdidas primarias de carga en una tubería [mca].
H_{rs} :	Pérdidas secundarias de carga en el sistema [mca].
H_s :	Presión de succión en la entrada de la bomba [mca].
H_v :	Presión de vapor del fluido a la temperatura de bombeo [mca].
$NPSH_R$:	Cabeza neta positiva de succión requerida [mca]
$NPSH_d$:	Cabeza neta positiva de succión disponible en la entrada de la bomba [mca]
P_d :	Presión de descarga 1 (en la salida de la bomba) [mca].
P_s :	Potencia eléctrica consumida por un motor trifásico [W].

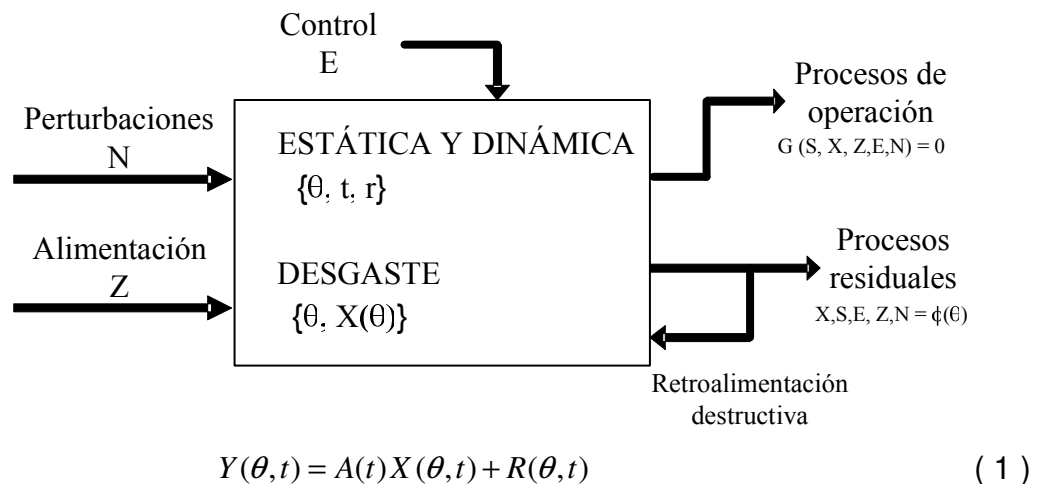
PDF:	funciones de distribución de probabilidad
PET:	Pronóstico del estado técnico.
PET ^o :	Pronóstico óptimo del estado técnico.
Q:	Caudal volumétrico [m ³ /s].
R _e :	Número de Reynolds [adimensional]
S	Parámetros de salida o síntomas.
t _b :	Instante en el que se realiza el diagnóstico.
t _p :	Tiempo pronosticado (futuro), t _p >t _b .
t _i :	Instante de tiempo pasado en que se conoce el estado técnico, t _i <t _b .
τ:	Término para el siguiente diagnóstico.
X ₁	Parámetros de estado
Y	Parámetros de diagnóstico.
z:	Numero e alabes del impulsor de la bomba.
ρ:	Densidad del fluido [kg/m ³].
η:	Eficiencia de la bomba [%].
$\frac{P_d}{\rho g}$	Altura de descarga en la salida de la bomba [mca].
$\frac{P_s}{\rho g}$	Altura de succión en la entrada de la bomba [mca].
$\frac{V_s^2}{2g}$	Altura de velocidad en la entrada de la bomba [mca].
$\frac{V_d^2}{2g}$	Altura de velocidad en la salida o descarga de la bomba [mca].

2 CONCEPTUALIZACIÓN DEL DIAGNÓSTICO TÉCNICO

Las bombas centrífugas presentan un determinado estado técnico en un instante dado. La secuencia temporal de estados que se presentan, conforman el tiempo de vida la bomba centrífuga. El cambio de estado es el resultado del efecto de los factores de explotación, que son factores de operación y factores externos. Para tomar una decisión con respecto a las acciones de mantenimiento en cada etapa de la vida, es posible definir los posibles estados técnicos de la bomba mediante métodos del diagnóstico técnico, que permiten dar respuesta a: ¿cuál es el estado actual de la bomba?, ¿cómo describir el pasado en función del estado actual?, ¿cómo pronosticar la evolución del estado actual?. Responder estos interrogantes implica un conjunto de tareas en el diagnóstico.

La Figura 1 presenta el modelo de diagnóstico adoptado para la bomba centrífuga (ZOLTOWSKI, 1997,62):

Figura 1. Modelo de diagnóstico.



donde:

θ : Tiempo lento de vida.

t : Tiempo rápido o dinámico.

$A(t)$: Matriz de de relación.

$R(\theta, t)$: Fenómenos aleatorios que se presentan durante el ciclo de vida de la máquina.

$X(\theta, t)$: Vector con los parámetros de estado.

$Y(\theta, t)$: Parámetros de diagnóstico.

2.1 ESTADO TÉCNICO DE LAS BOMBAS CENTRÍFUGAS

Los estados técnicos en los que se puede encontrar el sistema de bombeo constituyen el conjunto $W_k = \{w_k, k=1, 2, \dots, K\}$; el número de estados w_k depende de las exigencias del proceso de evaluación del estado técnico. En el caso más simple el conjunto de los posibles estados se divide en dos clases: buen estado y mal estado o avería (W^I). Los estados de avería pueden ser causados por dos clases de fallas: fallas hidráulicas y fallas mecánicas. Las fallas hidráulicas se relacionan directamente con el comportamiento del fluido, el cual está determinado por el caudal y la presión que desarrolla la bomba. Por otro lado, las fallas mecánicas están relacionadas directamente con el comportamiento de los elementos mecánicos que componen el sistema, tales como rodamientos, sellos mecánicos, empaquetaduras, etc. (NEPA, 56, 1993).

El estado w_k depende de N propiedades de estado independientes x_n ,

$$w_k = (x_n); n=1, 2, \dots, N. \quad (2)$$

Las propiedades de estado se deterioran durante la explotación de las bombas centrífugas, dando origen a los procesos de salida que se pueden dividir en:

- a) operación: resultan de la función principal del conjunto motor-bomba, esto es, transformar la energía eléctrica en energía mecánica y la energía mecánica en hidráulica.
- b) residuales: son un efecto secundario de los procesos principales; fenómenos vibro-acústicos, eléctricos, térmicos, envejecimiento de los lubricantes, entre otros.
- c) otros procesos físico-químicos: como por ejemplo la corrosión y la erosión.

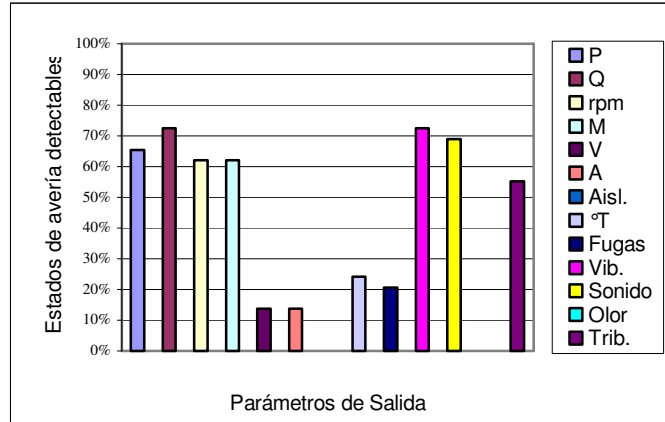
Los procesos de salida se expresan mediante cantidades que se pueden medir sin desmontar el sistema; estas cantidades se denominan parámetros de salida o síntomas S .

El estado de la bomba, w_k , se puede definir directamente si se conocen las propiedades de estado (2), o indirectamente si se conocen los parámetros de salida adecuados $\{s_j\}$:

$$w_k = f(\{s_j\}); j=1,2,\dots,I \quad (3)$$

Para la bomba centrífuga y el sistema de bombeo se establecen los parámetros de salida: presión (P) y caudal (Q) del fluido, velocidad de rotación del impulsor (rpm), vibraciones mecánicas en el conjunto motor-bomba (Vib.), sonido y/o ultrasonido, y propiedades de los lubricantes (Trib.), de acuerdo a los resultados de la Figura 2 (Torres, 62, 2004):

Figura 2. Parámetros de salida para la bomba centrífuga



Los parámetros de salida presentados constituyen la base para definir los parámetros de diagnóstico $y_j \in Y$. Con el fin de determinar el conjunto de parámetros de diagnóstico se emplean criterios que permiten discriminar los parámetros de salida como parámetros de diagnóstico.

$$x_n = f(\{y_j\}); j=1,2,\dots,I \quad (4)$$

La forma de (4) se establece al definir la relación entre las propiedades de estado y los parámetros de diagnóstico, para el que se obtiene un sistema de N ecuaciones que son la proyección del espacio de estados mediante las coordenadas x_1, x_2, \dots, x_N en el espacio de parámetros de diagnóstico y_1, y_2, \dots, y_J . Puede resultar engorroso determinar el valor de las propiedades de estado, por lo que el estado técnico w_k de la bomba se define en base al valor de los parámetros de diagnóstico $\{y_j, j=1,2,\dots,J\}$ según la relación:

$$w_k = f(\{y_j\}); j=1,2,\dots,J \quad (5)$$

El posible que el conjunto de parámetros de diagnóstico a considerar sea numeroso, lo que sugiere reducirlos. Esto implica pérdida de información y la aparición del elemento aleatorio.

Asumiendo que tanto las propiedades de estado como los parámetros de diagnóstico cambian con el tiempo, se requiere de una representación discreta de la señal. Por lo general las señales de diagnóstico se representan a través de propiedades de la misma señal como una serie de valores numéricos discretos y ordenados en el tiempo (serie de tiempo).

Una condición necesaria para la serie de tiempo es establecer una cantidad constante denominada “paso temporal” (Δt). Esta condición implica que el espacio temporal entre dos señales de diagnóstico consecutivas sea constante.

Como resultado de la acción de los procesos de desgaste se presenta un cambio en el valor de las propiedades de estado de la bomba centrífuga que conduce a superar los valores límite y cambiar o perder las propiedades de explotación del sistema.

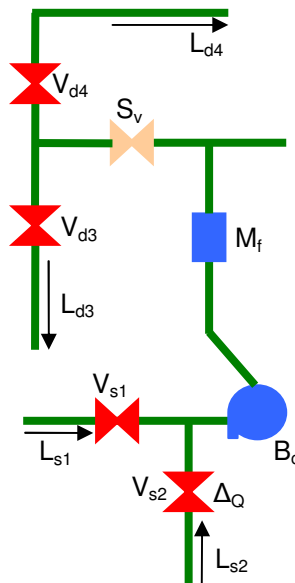
3 SISTEMA DE BOMBEO EXPERIMENTAL

Los planteamientos teóricos desarrollados en el documento se validan sucesivamente en el sistema de bombeo descrito en este capítulo, el cual consta de dos secciones, la primera describe los elementos y configuraciones del sistema, mientras la segunda describe su comportamiento.

3.1 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

El banco experimental es un sistema de bombeo que cuenta con los accesorios, equipos e instrumentos necesarios para la simulación de algunos modos de falla que pueden presentarse en estos sistemas. En este capítulo se describen los equipos que componen el banco de pruebas, su función y la forma de operación de los mismos. La Figura 3 muestra una fotografía del banco experimental y un esquema con los principales componentes que lo constituyen.

Figura 3. Sistema de bombeo experimental.



En el sistema de bombeo de la Figura 3 se observan los siguientes componentes:

V_{s1} : Válvula de la línea de succión 1.

V_{s2} : Válvula de la línea de succión 2.

V_{d3} : Válvula de la línea de descarga 3.

V_{d4} : Válvula de la línea de descarga 4.

S_v : Válvula automática.

L_{s1} : Línea de succión 1.

L_{s2} : Línea de succión 2.

L_{d3} : Línea de descarga 3.

L_{d4} : Línea de descarga 4.

M_f : Medidor de flujo.

B_c : Bomba centrífuga.

El banco experimental cuenta con seis sistemas de bombeo alternativos. Esto quiere decir que es posible adaptar el banco experimental para trabajar en seis circuitos diferentes. La configuración que se selecciona para la investigación es la que constituye el sistema [1,2-3]. Cuando se hace referencia a este sistema, significa que se están trabajando las dos líneas de succión y la línea de descarga 3 (ver Figura 3). Esta configuración se considera adecuada para los experimentos dado que fue diseñado para trabajar en el punto de operación (buen estado) y en estados de avería, simulando obstrucciones en diferentes puntos de la red hidráulica. (Salazar, 40, 2005) (Torres,116,2004)

3.1.1 Variador de velocidad. El variador de velocidad es un convertidor de frecuencia marca Siemens, referencia Micromaster 440, de 3 Hp de potencia. Está ubicado en la parte inferior del tablero eléctrico del banco experimental. Su función es controlar velocidad de giro y el torque del impeler de la bomba, variando la frecuencia de la corriente eléctrica del motor. La velocidad nominal del motor es de

1708 rpm cuando la frecuencia seleccionada es 60 Hz. La Figura 4 muestra el variador con sus respectivos pulsadores y teclas de control (Siemens,18,2005).

Figura 4. Variador de velocidad Siemens-Micromaster 440 de 3 hp.



3.1.2 Válvula automática. Es una válvula neumática marca Valtek, referencia Trooper. Está ubicada en la línea de descarga del banco experimental. Su función es restringir el caudal que circula por el sistema; esto se logra controlando su porcentaje de apertura. Cuando el porcentaje de apertura es cero (Apertura = 0%), la válvula estará totalmente cerrada y el caudal será cero ($Q = 0$). Por el contrario, si el porcentaje de apertura es cien (Apertura = 100%), la válvula estará completamente abierta y el caudal será el máximo que puede entregar la bomba (Flowserve,12,1998).

Figura 5. Válvula del sistema de bombeo experimental



3.1.3 Pinza amperimétrica. La pinza amperimétrica (AC current clamp) es un dispositivo portátil marca Fluke, referencia i200s (ver Figura 6). Se utiliza para

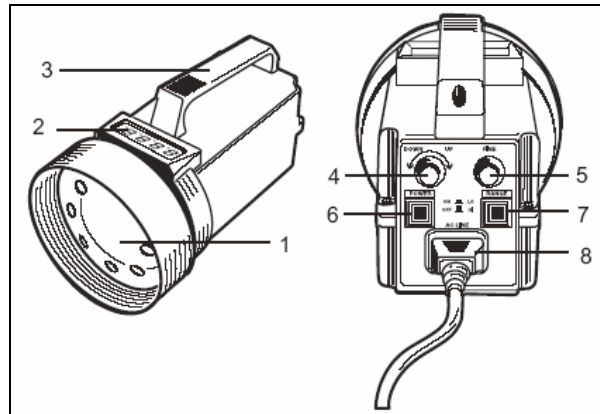
medir la corriente que consume el motor de la bomba. Cuenta con dos escalas de medición, hasta 20 Amperios o hasta 200 Amperios. La configuración por defecto es la escala de 0-20 Amperios, y esta es la escala que se utiliza para realizar las mediciones en el banco experimental. Dicha pinza se instala abarcando una de las líneas eléctricas que alimentan el motor. (Fluke,1,1998).

Figura 6. Pinza amperimétrica marca Fluke, referencia i200s



3.1.4 Lámpara estroboscópica. La lámpara estroboscópica es un tacómetro digital, marca extech, modelo 461830 (ver Figura 7). Se utiliza para medir las rpm del motor de la bomba. Tiene dos rangos de medición, bajo (100 – 1000 rpm) y alto (1000 – 10000 rpm). Para su utilización se conecta a una fuente de corriente alterna a 110 V. Para medir las RPM del motor, se enciende la lámpara, se selecciona al rango de medición adecuado, se gradúan las perillas de ajuste de velocidad y medición hasta estabilizar la marca reflectiva del ventilador del motor y se leen las rpm en la pantalla del LED de la lámpara (Extech,6,2003).

Figura 7. Lámpara estroboscópica marca extech, modelo 461830



Extech, 5, 2003.

De la Figura 7 se observan los siguientes componentes:

- 1) Lámpara de xenón.
- 2) Pantalla indicadora del LED.
- 3) Agarradera de la lámpara.
- 4) Perilla de ajuste de la velocidad de giro.
- 5) Perilla de ajuste de medición.
- 6) Switch de encendido ON/OFF
- 7) Switch para seleccionar rango de medición.
- 8) Cable y enchufe para conectar a la corriente eléctrica (110 V).

3.1.5 Transductores de presión. La medición de presiones se realiza mediante cuatro transductores, dos de presión absoluta y dos de presión relativa o manométrica. Estos transductores son alimentados con 15 V DC (15 voltios de corriente directa) y entregan una señal de corriente de 4-20 mA (Danfoss,2,2002) (Siemens,115,2003). Los cuatro transductores se calibraron para medir presiones absolutas en metros de columna de agua [mca].

3.1.5.1 Transductores de presión relativa. Estos transductores sólo pueden ser utilizados para medir presiones positivas, es decir, presiones superiores a la presión atmosférica. Por esta razón, no pueden utilizarse para medir presión en las líneas de succión del sistema, donde la presión es inferior a la presión atmosférica como consecuencia del proceso de succión de la bomba.

Figura 8. Transductor de presión relativa marca Danfoss MBS 3000



Las presiones en la línea de descarga del banco experimental se miden mediante transductores de presión relativa marca Danfoss MBS 3000, referencia 060G1123 (ver Figura 8). El rango de funcionamiento de estos transductores es de cero a cuatro bares (0-4 bar) de presión relativa (Danfoss,4,2002).

3.1.5.2 Transductores de presión absoluta. Estos transductores pueden ser utilizados para medir presiones superiores e inferiores a la presión atmosférica. Por lo tanto pueden utilizarse para medir presión tanto en las líneas de succión como en las líneas de descarga del banco experimental. Los dos transductores de presión absoluta del banco experimental son marca Siemens SITRANS P y referencia ZD 7MF1580 (ver Figura 9). El rango de funcionamiento de estos transductores es de cero a diez bares (0-10 bar) de presión absoluta (Siemens,107,2003).

Figura 9. Transductor de presión absoluta, marca Siemens SITRANS P.



3.1.6 Acelerómetros. El banco experimental cuenta con tres acelerómetros marca Kistler, referencia 8704B50M1 (ver Figura 10). Estos dispositivos son sensores de vibración, y se utilizan para medir la aceleración de la vibración en el motor y en la bomba. Las vibraciones se miden en unidades de aceleración [m/s^2]. El rango de medición de aceleración de estos sensores es de $\pm 50g$ ($g = \text{gravidades} = 9.8 \text{ m/s}^2$) (Kistler,1).

Figura 10. Acelerómetro marca Kistler, referencia 8704B50M1



La medición correcta del nivel de vibración en un equipo requiere que el acelerómetro esté completamente fijo sobre el punto de medición. La fijación del acelerómetro puede realizarse por medio de una base magnética, cuando la superficie del punto de medición es metálica y totalmente plana. Cuando no es así, se requiere un agujero roscado para poder fijar el acelerómetro. Los puntos de

medición de vibración en el banco experimental están marcados como se muestra en la Figura 10.

3.1.7 Medidor de flujo y sensor óptico. La línea de descarga del banco experimental cuenta con un medidor de flujo o flujómetro marca Elster, referencia H4000 (ver Figura 11). El flujómetro es un equipo que mide el caudal (volumen de fluido por unidad de tiempo) que circula por el sistema en litros por segundo [L/s]. Cuenta con un pulsador opto-electrónico que genera un pulso por cada litro que pasa por el sistema (Elster,2).

El sensor óptico es un dispositivo que se instala sobre la pantalla del flujómetro. Su función es contar los pulsos que se generan durante un periodo de tiempo definido.

Figura 11. Medidor de flujo marca Elster, referencia H4000



3.1.8 Bomba centrífuga. El banco experimental cuenta con una bomba centrífuga marca Sterling, referencia Nowa 5016 (ver Figura 12). Esta bomba tiene carcasa en espiral, es horizontal de una sola etapa, el diámetro del impulsor es 165 mm y el rango de operación es de 0-3600 rpm. Su función dentro del sistema es succionar fluido y agregarle potencia hidráulica (Sterling,2,2003).

3.1.9 Motor eléctrico. El motor que se muestra en la Figura 12 es marca Siemens, referencia 1LA7. Es un motor trifásico de 3 hp de potencia alimentado con corriente alterna a 220 voltios. La velocidad nominal de este motor cuando la frecuencia de la corriente de alimentación es 60 Hz es 1708 rpm. La función del motor dentro del banco experimental es accionar el impulsor de la bomba, para que la energía mecánica sea convertida en energía hidráulica.

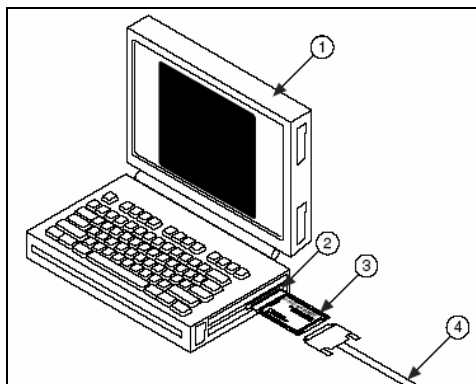
Figura 12. Conjunto motor-bomba del banco experimental



3.1.10 Control y adquisición de datos. La configuración del sistema de control y adquisición de datos del banco experimental es la que se muestra en la Figura 13. El sistema está compuesto por un computador portátil que cuenta con una ranura PCMCIA, una tarjeta de adquisición de datos y los accesorios para comunicar el sistema con los instrumentos y controles.

La tarjeta de adquisición de datos es marca National Instruments, referencia DAQCard-6062E. Esta tarjeta es multifuncional para la adquisición o entrega de señales análogas y digitales. Su función dentro del banco experimental es el control y la adquisición de datos del sistema. La tarjeta convierte las señales recibidas en datos y convierte los datos entregados por el usuario en señales análogas o digitales para controlar el sistema (National,11,2002).

Figura 13. Configuración del sistema de control y adquisición de datos del banco experimental



National, 21, 2002

De la Figura 13 se observan los siguientes componentes:

- 1) Computador Portátil
- 2) Ranura para insertar la tarjeta de adquisición de datos
- 3) Tarjeta de adquisición de datos
- 4) Cable para comunicación con la caja de terminal de conexiones

3.2 CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA DE BOMBEO EXPERIMENTAL

Un sistema de bombeo se caracteriza por un conjunto de gráficas que describen el comportamiento durante su operación, que reciben el nombre de curvas características. Todas ellas se trazan en función del caudal y a una velocidad de giro constante. En cada sección de este capítulo se aborda una curva característica, se presenta un gráfico de una curva típica, y las expresiones matemáticas necesarias para trazar dicha curva. En la sección 3.2.7 se presenta la forma de hallar el punto de operación de un sistema de bombeo (Mataix,540,1982).

3.2.1 Curva característica del funcionamiento de la bomba. La curva de funcionamiento de una bomba es una gráfica que muestra la altura total desarrollada por la bomba en función del caudal entregado por la misma, a una velocidad de giro constante. (Mott,419,1996).

El cálculo de la altura total entregada por la bomba requiere que se aplique el teorema de Bernoulli entre la succión (entrada) y la descarga (salida) de la bomba. La expresión (6) muestra el teorema de Bernoulli aplicada entre la succión y la descarga de una bomba (Mataix,106,1982).

$$\boxed{\frac{P_s}{\rho g} + \frac{V_s^2}{2g} + Z_s + H_B = \frac{P_d}{\rho g} + \frac{V_d^2}{2g} + Z_d} \quad (6)$$

Mataix, 106, 1982

Donde:

$\frac{P_s}{\rho g}$: Altura de succión en la entrada de la bomba [mca].

$\frac{V_s^2}{2g}$: Altura de velocidad en la entrada de la bomba [mca].

Z_s : Altura potencial geodésica de la entrada o succión de la bomba [mca].

H_B : Altura total agregada por la bomba al fluido [mca].

$\frac{P_d}{\rho g}$: Altura de descarga en la salida de la bomba [mca].

$\frac{V_d^2}{2g}$: Altura de velocidad en la salida o descarga de la bomba [mca].

Z_d : Altura potencial geodésica de la salida o descarga de la bomba [mca].

Los diámetros de la tubería de succión y de descarga del banco experimental donde se miden las presiones son iguales ($D=2''$) por lo que $V_s=V_d$. Teniendo en cuenta que las presiones medidas experimentalmente están en metros de columna de agua, al simplificar y despejar H_B de (6) se obtiene:

$$H_B = H_d - H_s + (Z_d - Z_s) \quad (7)$$

Donde:

H_B : Altura total entregada por la bomba [mca].

H_d : Presión de descarga en la salida de la bomba [mca].

H_s : Presión en la entrada de la bomba [mca].

Z_d-Z_s : Diferencia de altura entre la succión (entrada) y la descarga (salida) de la bomba [m].

3.2.2 Curva característica de la eficiencia de la bomba. La eficiencia de la bomba es otra curva característica de un sistema de bombeo que se traza en función del caudal a una velocidad de giro constante. La eficiencia de una bomba es la relación entre la potencia hidráulica agregada por la bomba al fluido y la potencia eléctrica consumida por el motor.

El valor de la eficiencia es cero cuando el caudal es cero. A medida que el caudal aumenta, la eficiencia aumenta hasta un valor máximo, denominado punto de máximo rendimiento. A partir de este punto, cuando aumenta el caudal, la eficiencia disminuye. La expresión (8) se utiliza para calcular la eficiencia de una bomba (201).

$$\eta = 100 \frac{P_h}{P_e} \quad (8)$$

Mott, 201, 1996

Donde:

η : Eficiencia de la bomba [%].

P_h : Potencia hidráulica entregada por la bomba al fluido [W].

P_e : Potencia eléctrica consumida por el motor [W].

3.2.3 Potencia hidráulica entregada por la bomba. Es el producto del peso específico del fluido, el caudal entregado por la bomba y la altura total desarrollada por la bomba (200).

$$P_h = \gamma Q H_B \quad (9)$$

Mott, 200, 1996

Donde:

P_h : Potencia hidráulica agregada por la bomba al fluido [W].

γ : Peso específico del fluido [N/m³].

Q : Caudal volumétrico [m³/s].

H_B : Altura total entregada por la bomba [mca].

3.2.3.1 Peso específico de un fluido. Es el peso del fluido por unidad de volumen. Se calcula hallando el producto de su densidad por la aceleración de la gravedad. El peso específico puede expresarse de la forma:

$$\gamma = \rho g \quad (10)$$

Mott, 12, 1996

Donde:

γ : Peso específico del fluido [N/m³].

ρ : Densidad del fluido [kg/m³].

g : Aceleración de la gravedad [9,8 m/s²].

3.2.3.2 Caudal volumétrico en una tubería. El volumen de fluido que fluye por una tubería por unidad de tiempo, es el producto de la velocidad del fluido y el área transversal de la sección por donde fluye. El caudal volumétrico puede expresarse por medio de: (Mataix, 95, 1982).

$$Q = cA \quad (11)$$

Mataix, 95, 1982

Donde:

Q : Caudal volumétrico [m³/s].

A : Área de una sección transversal del tubo [m²].

c : Velocidad media normal a la sección considerada [m/s].

3.2.4 Potencia eléctrica consumida por el motor de la bomba. La bomba del banco experimental es movida por un motor trifásico. La potencia eléctrica que consume dicho motor es el producto del voltaje, la corriente, el factor de potencia y

la raíz de 3. La ecuación expresa la potencia que consume un motor trifásico (Gussow,343,1991).

$$P_e = (\sqrt{3})VI \cos(\phi) \quad (12)$$

Gussow,343,1991

Donde:

P_e : Potencia eléctrica consumida por un motor trifásico [W].

V: Voltaje de la línea de alimentación [220V].

I: Corriente consumida [A].

$\cos(\phi)$: Factor de potencia del motor [0,83].

3.2.5 Curva característica del sistema de bombeo. La curva de un sistema de bombeo es una gráfica que muestra la altura de bombeo requerida en función del caudal a una velocidad de giro constante. La altura de bombeo requerida por el sistema es igual a la elevación que la bomba le debe proporcionar al fluido más la pérdida total de carga en todo el sistema (Franzini,425,1999).

La obtención de la curva característica de un sistema de bombeo puede hacerse de varias formas. Una de ellas consiste en variar el caudal que circula por el sistema variando el porcentaje de apertura de una válvula en la línea de descarga. En este caso se debe calcular la altura requerida para cada valor de caudal, sumando las pérdidas totales en el sistema con la elevación que la bomba le debe dar al fluido. Otra forma de obtener la curva de un sistema es variando las revoluciones del motor. Este método requiere que se conozca el punto de operación a una velocidad de giro dada. Para obtener la curva, se comienza a operar el sistema en el punto de operación que se conoce. Las siguientes mediciones se toman con el sistema operando igual, excepto que se va

disminuyendo la velocidad de giro del motor. Ahora, se debe calcular la altura total agregada por la bomba al fluido, y se debe medir el caudal para cada velocidad de giro. Los valores de caudal y las alturas desarrolladas por la bomba se grafican y esta es la curva del sistema (Pineda,2005).

$$H_R = Z_B + H_L \quad (13)$$

Franzini,425,1999

Donde:

H_R : Altura requerida por un sistema de bombeo [mca].

Z_B : Elevación que la bomba le debe proporcionar al fluido [m]

H_L : Pérdida total de carga en todo el sistema [mca].

3.2.5.1 Pérdidas de carga en un sistema de bombeo. La pérdida total de carga en un sistema de bombeo es la suma de las pérdidas primarias y las pérdidas secundarias: (Mataix,203,1982).

$$H_L = H_{rp} + H_{rs} \quad (14)$$

Mataix, 205, 1982

Donde:

H_L : Pérdida total de carga en todo el sistema [mca].

H_{rp} : Pérdidas primarias de carga en el sistema [mca].

H_{rs} : Pérdidas secundarias de carga en el sistema [mca].

3.2.5.1.1 Pérdidas primarias de carga. El contacto del fluido con la tubería, el rozamiento entre las capas del fluido en el régimen laminar y el rozamiento de las partículas de fluido entre sí en el régimen turbulento, origina pérdidas de energía

hidráulica denominadas pérdidas primarias o pérdidas en tramo recto. Las pérdidas primarias en una tubería son función del factor de fricción, la longitud y el diámetro de la misma, así como de la velocidad del fluido. Estas se calculan por medio de la fórmula de Darcy – Weisbach: (Mataix, 203, 1982).

$$H_{rp} = f \frac{L \cdot c^2}{2D \cdot g} \quad (15)$$

Mataix, 206, 1982.

Donde:

H_{rp} : Pérdidas primarias de carga en una tubería [mca].

f : Factor de fricción de la tubería [adimensional].

L : Longitud de la tubería [m].

D : Diámetro de la tubería [m].

c : Velocidad media del fluido [m/s].

g : Aceleración de la gravedad [m/s^2].

3.2.5.1.1.1 El factor de fricción de una tubería. Es un número adimensional que depende del número de Reynolds y de la rugosidad relativa de la tubería. Para el cálculo de este factor se utiliza el diagrama de Moody. Este diagrama está constituido por dos ecuaciones, la (32) se utiliza para flujo laminar ($Re < 2000$) y la (17) para flujo turbulento ($Re > 4000$) (Mataix,218,1982) (Mott,223,1996).

$$f = \frac{64}{Re} \quad (16)$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_2 \left(\frac{\epsilon}{3.7D} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f}} \right) \quad (17)$$

Mataix,216,1982

Donde:

f : Factor de fricción de la tubería [adimensional].

ϵ : Rugosidad absoluta de la tubería [m].

D : Diámetro de la tubería [m].

Re : Número de Reynolds [adimensional].

3.2.5.1.1.2 Número de Reynolds. El cociente de las fuerzas inerciales por las fuerzas viscosas de un fluido se denomina número de Reynolds. Este parámetro adimensional determina si un fluido es laminar o turbulento y se calcula por medio de: (Mataix,194,1982)

$$R_e = \frac{cD}{\nu} \quad (18)$$

Mataix,194,1982

Donde:

Re : Número de Reynolds [adimensional].

c : Velocidad media del fluido [m/s].

D : Diámetro de la tubería [m].

ν : Viscosidad cinemática del fluido [m²/s].

3.2.5.1.1.3 Viscosidad cinemática de un fluido. La relación entre la viscosidad dinámica y la densidad de un fluido se denomina viscosidad cinemática. Esta propiedad se representa por medio de: (Mataix,24,1982)

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (19)$$

Donde:

ν : Viscosidad cinemática del fluido [m^2/s].

μ : Viscosidad dinámica del fluido [$\text{Pa} \cdot \text{s}$].

ρ : Densidad del fluido [kg/m^3].

3.2.5.1.1.4 Viscosidad dinámica de un fluido. El coeficiente de fricción interna de un fluido es una propiedad del fluido que se denomina viscosidad dinámica. La viscosidad es la resistencia a que las capas de fluido deslicen unas sobre otras, o dicho de otro modo, la viscosidad es la fuerza o resistencia que pone un fluido para fluir de un lugar a otro (Mataix,21,1982).

La viscosidad dinámica de los fluidos varía sustancialmente con la temperatura. Aumenta con la temperatura cuando el fluido es un gas y disminuye cuando el fluido es un líquido.

3.2.5.1.2 Pérdidas secundarias de carga. Las pérdidas que se dan en las transiciones de la tubería (restricción, expansión o cambio de dirección de la corriente de fluido), tales como codos, válvulas, contracciones, y en general en todos los accesorios de la tubería, se denominan pérdidas secundarias (Mataix,236,1982).

$$H_{rs} = K \frac{c^2}{2g} \quad (20)$$

Mataix,237,1982.

Donde:

H_{rs} : Pérdidas secundarias de carga [mca].

K: Coeficiente de pérdida de carga secundaria [adimensional].

c: Velocidad media del fluido [m/s].

g: Aceleración de la gravedad [m/s²].

El coeficiente de pérdida de carga secundaria K depende del tipo de accesorio, del número de Reynolds, de la rugosidad y de la configuración de la corriente antes del accesorio. Los valores de K para cada tipo de accesorio se calculan experimentalmente y se pueden consultar en tablas.

3.2.6 Curva característica de la cabeza neta de succión positiva disponible. La cabeza neta de succión positiva disponible (NPSH_d) también es una curva característica que se obtiene en función del caudal a una velocidad de giro constante. El NPSH_d es la cabeza o altura total absoluta disponible en la entrada de la bomba. El valor de NPSH_d es función de las propiedades del fluido y de las características del sistema de bombeo. La expresión (21) permite calcular el valor de NPSH_d durante la operación de los sistemas alternativos del banco experimental. (Mataix,398,1982) (Mott,435,1996).

$$NPSH_d = H_E - H_v + \frac{c_E^2}{2g} \quad (21)$$

Mataix,399,1982.

Donde:

NPSH_d: Cabeza neta positiva de succión absoluta disponible [mca].

H_E: Cabeza de presión estática (absoluta) en la entrada de la bomba [mca].

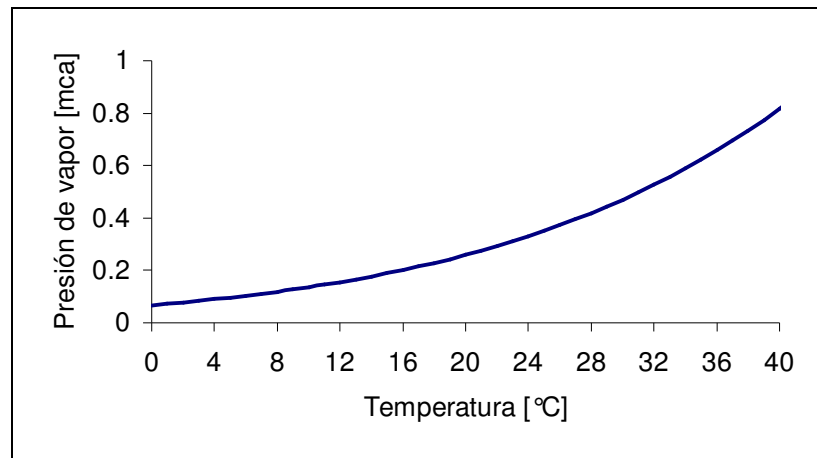
H_v: Presión de vapor del fluido a la temperatura de bombeo [mca].

c_E: Velocidad del fluido en la entrada de la bomba [m/s].

g: Aceleración gravitacional [9.8 m/s²].

La presión de vapor de un fluido es una propiedad que tienen todos los líquidos y que depende de la temperatura. Es la presión absoluta a la cual el fluido comienza a evaporarse, dado un valor de temperatura (Mataix,30,1982). El fluido que se maneja en el banco experimental es el agua. La presión de vapor del agua aumenta con la temperatura, tal como lo muestra la Figura 14.

Figura 14. Presión de vapor del agua en función de la temperatura



Mataix,321,1982

3.2.6.1 Cabeza neta de succión positiva requerida ($NPSH_R$). La curva del $NPSH_d$ debe compararse con la curva de la cabeza neta de succión positiva requerida ($NPSH_R$), la cual es proporcionada por el fabricante. El $NPSH_R$ es la cabeza o altura total absoluta requerida en la entrada de la bomba para que en el líquido no se formen burbujas de vapor. Si la presión en la entrada de la bomba disminuye hasta el punto donde comienzan a formarse burbujas de vapor, la bomba comienza a cavitarse. Para que no se presente la cavitación en una bomba, el valor de $NPSH_d$ deberá ser siempre mayor al valor de $NPSH_R$ (Mott,435,1996).

3.2.6.2 Variación del $NPSH_R$ con la velocidad de giro de la bomba. El fabricante de una bomba, por lo general proporciona la curva del $NPSH_R$ para el agua y para

un solo valor de velocidad de operación. Si la bomba se opera a una velocidad de giro diferente, el nuevo $HPSH_R$ puede calcularse por medio de:

$$(NPSH_R)_2 = \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^2 (NPSH_R)_1 \quad (22)$$

Mott, 437, 1996

$(NPSH_R)_1$: Cabeza neta de succión positiva requerida a la velocidad de operación dada por el fabricante [mca].

N_1 : Velocidad de operación a la cual el fabricante proporciona el valor de $(NPSH_R)_1$ [rpm].

$(NPSH_R)_2$: Cabeza neta de succión positiva requerida a la nueva velocidad de operación [mca].

N_2 : Nueva velocidad de operación de la bomba [rpm].

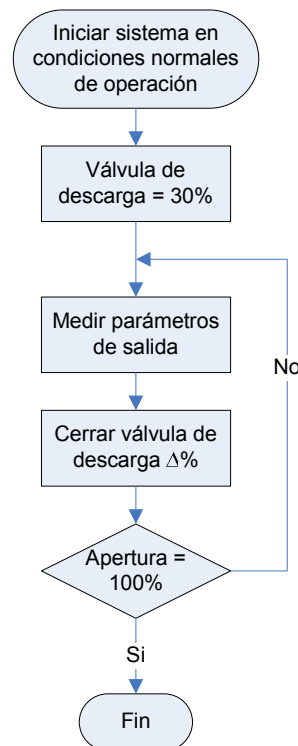
3.2.7 Punto de operación de un sistema de bombeo. El funcionamiento de una bomba es función de sus características y de las características del sistema de bombeo. Para encontrar el punto de operación de una bomba, se deben trazar dos curvas, la altura total entregada por la bomba (H_B vs. Q) y la curva característica del sistema (H_R vs. Q). Ambas curvas se deben trazar en función del caudal y a una velocidad de giro constante. El punto de operación es la intersección de estas dos curvas. (Franzini, 425, 1999).

El punto de operación de un sistema de bombeo debe estar lo más cercano posible al punto de máximo rendimiento. Cuando el punto de operación está muy alejado del punto de máximo rendimiento, quiere decir que la bomba seleccionada no es la adecuada para las condiciones y características del sistema de bombeo (Franzini, 425, 1999). Además, el sistema debe operarse muy cerca al punto de operación.

3.3 EXPERIMENTACIÓN: CURVAS CARACTERÍSTICAS REALES

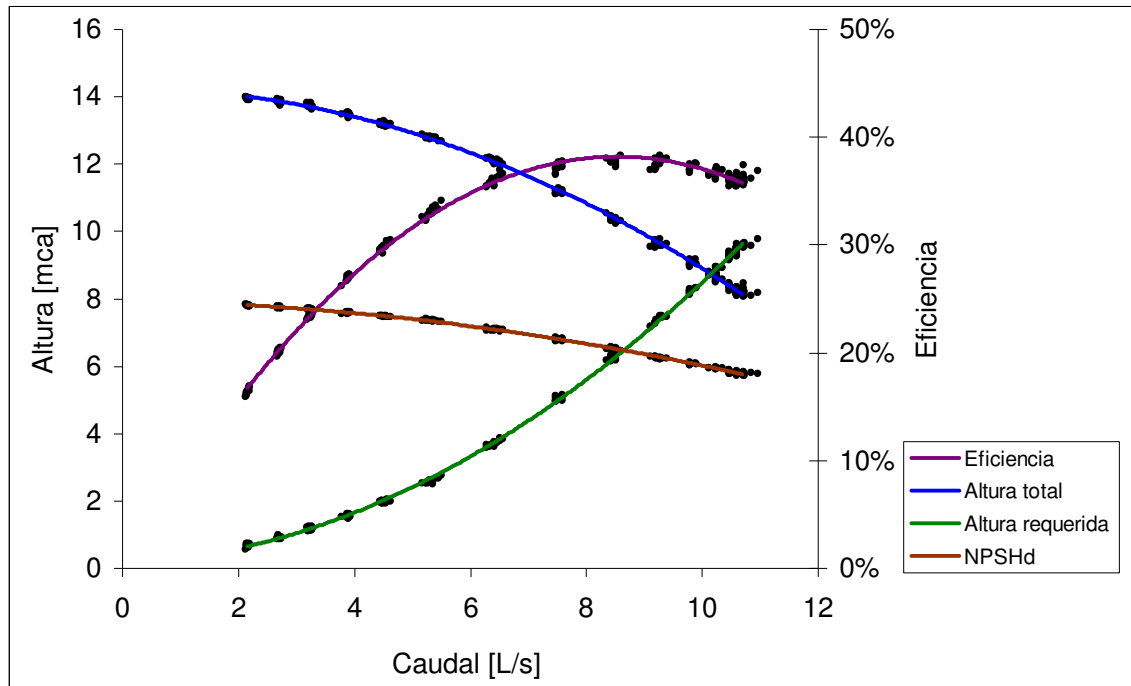
Las curvas características para el sistema de bombeo experimental configurado, se construyeron a partir del procedimiento de la Figura 15:

Figura 15. Procedimiento para la construcción de las curvas características del sistema de bombeo.



El sistema se operó a diferentes valores de caudal, y se registraron mediciones de altura total entregada por la bomba, altura requerida por el sistema, $NPSH_d$ en el sistema y la eficiencia del sistema. Las mediciones se realizaron a una velocidad de giro constante de 1708 rpm (la cual se obtiene suministrando corriente eléctrica al motor a 60 Hz), a una presión atmosférica de 8.7 mca y a una temperatura de 20 grados celsius aproximadamente.

Figura 16. Curvas características del sistema de bombeo experimental.



Las curvas características se realizaron doce veces para el sistema de bombeo experimental y se presentan en la Figura 16. Para variar el caudal se varió el porcentaje de apertura de la válvula que se encuentra en la línea de descarga del sistema. Las mediciones comenzaban con la válvula abierta un 30%, aumentando 5% cada vez hasta alcanzar el 100% de apertura. Por último se determinó que en el punto de operación del sistema, los valores esperados de caudal y altura para el punto de operación de cada sistema alternativo.

La operación de los diferentes sistemas alternativos de bombeo para hallar las curvas características se generan por medio del programa “CurvasBomba.vi” escrito por el autor en Labview® 7.0, como herramienta para el proyecto.

El sistema [1,2-3] opera de modo normal cuando las válvulas de las líneas de succión y la válvula de la línea de descarga 3 están completamente abiertas. La válvula de la línea de descarga 4 deberá permanecer completamente cerrada. Se

encontró que el punto de operación normal para este sistema corresponde a un caudal de 10.15 L/s y a una altura de 8.74 mca. Estos valores de caudal y altura corresponden aproximadamente a un porcentaje de apertura del 84%. de la válvula automática (línea de descarga).

4 MODULO DE SEÑALES

El módulo de señales se constituye en la fuente de información tanto para el diagnóstico técnico como para el pronóstico de la bomba centrífuga. En este módulo se incluyen instrumentos, accesorios, hardware, software y los procedimientos relacionados con la recolección de la información.

4.1 INSTRUMENTACIÓN

Los instrumentos para la recolección de datos se seleccionan de acuerdo a los parámetros de salida que se consideran en el diagnóstico de la bomba centrífuga; estos son: presión hidráulica, caudal, velocidad de giro del impeler, voltaje, corriente, vibraciones y propiedades de los lubricantes (sección 2.1). Dado a la naturaleza del experimento y los objetivos de la investigación, se excluyen del análisis las propiedades de los lubricantes.

Los instrumentos que recolectan las señales para los parámetros de salida establecidos son: transductores de presión, medidor de flujo, tacómetro (estroboscopio), voltímetro, pinza amperimétrica y acelerómetros. Los instrumentos y demás elementos necesarios para la recolección de datos se detallan en la sección 3.1.

4.2 PARÁMETROS DE CAPTURA Y DIGITALIZACIÓN DE LAS SEÑALES

Los parámetros de captura, frecuencia de muestreo y número de muestras, se deben establecer de acuerdo a un análisis dinámico del sistema operando bajo condiciones normales para determinar las frecuencias o rangos de frecuencia que se deseen considerar para el diagnóstico. En el sistema motor-bomba pueden

resultar frecuencias debido a la velocidad de rotación, a los componentes dinámicos del motor, al paso de alabes del impulsor, a la frecuencia de línea, a problemas asociados con cavitación o a frecuencias naturales de los componentes del sistema (Saavedra, A-15,1997).

En la Tabla 1 se listan las frecuencias que pueden encontrarse en el sistema de bombeo operado a 1709 rpm (velocidad nominal) y que se consideran de interés para el logro de los objetivos del proyecto; las frecuencias de otros elementos como los rodamientos, se descartan dado a que no se relacionan con los modos de falla simulados propuestos en el proyecto. La frecuencia de rotación es el número de revoluciones por segundo, mientras que la frecuencia de paso de alabes (f_p) se calcula por medio de la ecuación (23). La frecuencia natural del sistema es cortesía del laboratorio de mecánica experimental de la Universidad EAFIT.

$$f_p = \frac{z \cdot rpm}{60} \quad (23)$$

Tabla 1. Frecuencias de vibración que pueden encontrarse operando el sistema a 1709 rpm.

Frecuencia	Valor [Hz]	Descripción
Rotación	28,5	Frecuencia de giro del sistema motor-bomba
Natural ¹	120	Frecuencia natural del sistema motor-bomba
Paso de alabes	170,9	Frecuencia de paso de alabes de la bomba

La frecuencia de muestreo (f_s) se establece de acuerdo al teorema de muestreo de Nyquist, es decir se muestrea al doble de la máxima frecuencia (f_{max}) que se quiere encontrar en la señal:

¹ La frecuencia natural base-máquina del sistema de bombeo se midió experimentalmente a partir de una prueba de impacto que puede ser consultada en los proyectos de grado de Guerrero y Salazar.

$$f_{\max} = \frac{f_s}{2} \quad (24)$$

El número de muestras (N) permite fijar la resolución de frecuencia (Δf) en la señal capturada (Chugani, 1998, 62):

$$\Delta f = \frac{f_s}{N} \quad (25)$$

4.3 SELECCIÓN DE LOS PUNTOS DE MEDICIÓN

La selección de puntos de recolección de datos se basa en la función de coherencia (26) que es función de la densidad de la potencia espectral (P_{xx} y P_{yy}) y de la densidad de la potencia espectral cruzada (P_{xy}) de las señales tomadas de los puntos de adquisición x , y :

$$C_{xy}(f) = \frac{|P_{xy}(f)|^2}{P_{xx}(f)P_{yy}(f)} \leq 1 \quad (26)$$

según el criterio de la mínima coherencia dado que son los que aportan la mayor cantidad de información para las tareas de diagnóstico, o la menor afinidad dada por:

$$In_{xy}(\theta_i) = \sum_{x=1}^l \log \frac{1}{1 - C_{xy}(f_x, \Delta f_x, \theta_i)} \quad (27)$$

La afinidad para un instante del tiempo de vida de la bomba centrífuga θ_i depende la coherencia calculada para l frecuencias entre los puntos x , y .

El criterio anterior, se complementa con la probabilidad de acierto en la decisión:

$$T_d(\theta_i) = \frac{P_g P_z(y_m)}{P_g P_z(y_m) + [1 - P_g][1 - P_z(y_m)]}, \quad (28)$$

de acuerdo al criterio de selección $\max T_d(\theta_i)$, donde P_g es la probabilidad a priori de que el artefacto se encuentre en buen estado, y P_z es la probabilidad total para m puntos de entrada de no sobrepasar el valor límite:

$$P_z(y_m) = \prod_{j=1}^m P(y_j) \quad (29)$$

4.3.1 Algoritmo. Se utiliza el siguiente algoritmo para la selección de los puntos de recolección de datos:

- Seleccionar para el tiempo de vida inicial ($\theta=\theta_1$) m puntos de toma de señal con base en un análisis estructural, funcional, de accesibilidad de la bomba centrífuga o en base a normas establecidas.
- Calcular la coherencia C_{xy} entre los puntos seleccionados, obteniendo simultáneamente los coeficientes de coherencia $C_{xy}(f, \Delta f, \theta_i)$.
- Establecer el valor limite de la función de coherencia C_{xy} .
- Establecer la similitud o afinidad de información entre puntos mediante $\ln_{xy}(\theta_i)$.
- Evaluar el acierto de la selección de puntos de medición mediante $T_d(\theta_i)$ con datos históricos.
- Descartar los puntos innecesarios de acuerdo a los criterios: $\min T_d(\theta_i)$, $\max \ln_{xy}(\theta_i)$, $\max C_{xy}(f)$.

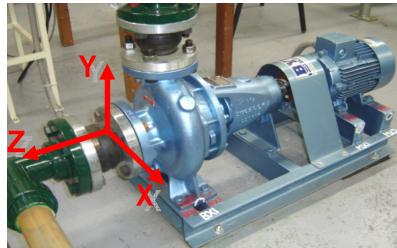
- Proceder similarmente para $\theta = \theta_2, \dots, \theta_i$ y realizar la selección final de puntos de medición.

4.4 EXPERIMENTACIÓN

Los puntos de medición se seleccionan de acuerdo con la norma ISO 2372, que corresponde a los puntos donde la energía de la vibración se transmite a los soportes flexibles u otras partes de la máquina. Las mediciones se pueden realizar en las direcciones de los tres ejes perpendiculares (ISO 2372, 3,1974).

El sistema motor-bomba del banco experimental cuenta con varios elementos rotatorios, entre ellos el eje del motor y el impeler de la bomba. De acuerdo con la norma ISO 2372, se marcan puntos de recolección de datos sobre los rodamientos que soportan el eje del motor y sobre la carcasa que alberga el impeler de la bomba. También se seleccionan como puntos de medición los soportes o descansos del motor y de la bomba.

Figura 17. Sistema coordinado y puntos para la medición de vibraciones



Se seleccionaron cinco puntos (relevantes de acuerdo con la norma ISO 2372), dos en la carcasa de la bomba (en las direcciones x e y), dos en los rodamientos del motor (en las direcciones x e y) y otro punto en el acople o base entre el motor y la bomba en la dirección y.

Se hace trabajar el sistema de bombeo en el punto de operación para tomar señales de los puntos marcados. Se calcula la coherencia para los puntos marcados y se construye la matriz de coherencia (Tabla 2) partir de las frecuencias de interés (Tabla 1) tomadas de las funciones de coherencia.

Tabla 2. Coherencia entre puntos de medición

Puntos	Carcasa y	Carcasa x	Motor x	Motor y	Acople y
Carcasa y					
Carcasa x	0,45 0,4 0,38				
Motor x	0,67 0,52 0,42	0,37 0,34 0,31			
Motor y	0,71 0,44 0,43	0,52 0,45 0,38	0,93 0,9 0,88		
Acople y	0,75 0,69 0,66	0,59 0,5 0,47	0,67 0,55 0,57	0,67 0,47 0,4	

La matriz de coherencia (Tabla 2) es simétrica, razón por la cual sólo se muestran los valores de la parte inferior. El valor de coherencia de dos señales medidas en el mismo punto siempre es uno, por lo tanto la coherencia entre los mismos puntos (diagonal) se omite. El objetivo es seleccionar los puntos más adecuados para la medición de vibración, es decir los puntos que pueden proporcionar mayor cantidad de información.

Se calcula la afinidad entre puntos de medición para las correspondientes coherencias y se ordenan en la Tabla 3. Se seleccionan, de acuerdo a los criterios establecidos, las parejas de puntos cuyas señales son las menos afines y cuyos valores de coherencia son pequeños; así mismo, se descartan aquellos que presentan alta afinidad. Los puntos menos coherentes (sombreados en verde) de

acuerdo a los resultados de la Tabla 3 son (Motor x, Carcasa x). Otros puntos que tienen bajo valor de coherencia son (Carcasa x, Carcasa y) y (Motor y, Carcasa x), sombreados en amarillo.

Tabla 3. Similitud de información entre puntos de medición.

Puntos	Carcasa y	Carcasa x	Motor x	Motor y	Acople y
Carcasa y					
Carcasa x	0,69				
Motor x	1,04	0,54			
Motor y	1,03	0,79	3,08		
Acople y	1,58	0,96	1,19	0,98	

Los puntos seleccionados para tomar las señales de vibración para el experimento son aquellos marcados en la carcasa de la bomba y sobre los rodamientos del motor, ambos en la dirección x del sistema coordenado. La Figura 17 muestra el sistema coordenado escogido por el autor. Las señales de vibración de estos dos puntos son las menos coherentes y en consecuencia las que más información pueden proporcionar para el diagnóstico.

5 MÓDULO DE PROCESAMIENTO DE SEÑAL

Las señales tomadas con los acelerómetros en los puntos de adquisición seleccionados en el módulo anterior, se procesan para obtener estimadores vibro-acústicos en medidas de amplitud, frecuencia y distribución, además de emplear métodos en el dominio del tiempo, en el dominio de la frecuencia y no estacionarios. Las tablas que se presentan en este capítulo, son una síntesis de las investigaciones adelantadas por GEMI.

El procesamiento se efectúa en el programa Analisis.m escrito en MatLab® por investigadores del grupo GEMI.

El capítulo se divide en dos secciones, la primera es una breve descripción de los estimadores vibroacústicos, mientras que la segunda presenta los estimadores que se obtienen de los parámetros de salida medidos en el sistema de bombeo experimental.

5.1 ESTIMADORES VIBROACÚSTICOS

Los estimadores vibro-acústicos que se consideran dentro de la investigación se tratan como parámetros de diagnóstico. La Tabla 4 compila los estimadores vibro-acústicos considerados, expone su formulación matemática, hace una breve descripción y la probable interpretación en términos de diagnóstico técnico.

Tabla 4. Resumen de las Características de la señal en amplitud

	FÓRMULA	DESCRIPCION	INTERPRETACION
MEDIA	$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$	Estimación del valor medio de toda la información. Indica el valor donde se encuentra centrada la información.	Una gran variación de este valor de referencia puede indicar que el sistema ha entrado en un estado anormal.
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}$	Primera medida de dispersión de la información respecto su media.	Incremento con la aparición de pulsos de choque (fallas relacionadas a rodamientos).
RMS	$x_{rms} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N x_i^2}{N}}$	RMS es la interpretación de una señal determinística como una señal continua. Mide el nivel global de una medición,	Muy utilizada para estimar el nivel de vibración de las máquinas respecto a un nivel de reposo. (cero).
SESGO	$y = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^3}{(N-1)\sigma^3}$	Medida de la asimetría de la información alrededor de su media. Si el sesgo es negativo, la dispersión de los datos alrededor de la media se encuentra más hacia la izquierda que hacia la derecha. Si el sesgo es positivo la dispersión sobre la medida se encuentra hacia la derecha. El sesgo de una distribución normal es cero.	Incremento sensible con la aparición de pulsos de choque. Puede presentar cambios significantes en desbalanceo y desalineamientos.

	FÓRMULA	DESCRIPCIÓN	INTERPRETACIÓN
KURTOSIS	$k = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^4}{(N-1)\sigma^4}$	<p>La Kurtosis de una distribución de probabilidad es una medida de que tan “gruesa” esta la terminación de la distribución, con relación a la medida de una distribución normal teniendo la misma desviación estándar. Distribuciones con terminaciones largas son llamadas “leptokurticas” y aquellas con terminación corta son llamadas “platikurticas”. Una distribución con la misma “Kurtosis” que una distribución normal es conocida como “mesokurtica” y tiene un valor de tres.</p>	<p>Con la aparición de fallas en rodamiento de bolas y el desarrollo consecuente de pulsos de choque, se genera una mayor dispersión en la distribución de probabilidad de vibración y por consiguiente, el valor de Kurtosis se desvía de tres.</p> <p>Incremento sensible con la aparición de pulsos de choque. Puede presentar cambios significantes en desbalanceo y desalineamiento.</p>
VALOR MÁXIMO	$x_{\max} = \max \{x(t)\}$	Representa el valor máximo alcanzado en la medición.	Incremento con la aparición de fallas relacionadas a rodamientos.
VALOR MÍNIMO	$x_{\min} = \min \{x(t)\}$	Menor valor de la señal medida en el tiempo.	Incremento con la aparición de fallas relacionadas a rodamientos.
FACTOR DE FORMA	$s_f = \frac{x_{rms}}{\bar{x}}$	El factor forma expresa la distorsión de las señales.	Con la presencia de múltiples armónico se genera una desviación en la media y amplitud que ocasionan el cambio en el factor de forma.

	FÓRMULA	DESCRIPCIÓN	INTERPRETACIÓN
FACTOR DE CRESTA	$c_f = \frac{x_{\max}}{x_{rms}}$	El factor de cresta representa la relación entre el valor máximo y el nivel global en una medición.	Valores altos del factor cresta revelan la aparición de pulsos de choque, por ejemplo, en fallas relacionadas a rodamientos y engranajes. Sin embargo, en el último momento de una falla en un rodamiento, el factor de cresta tiende a disminuir, Esto puede ser engañoso para el diagnóstico.
FACTOR DE IMPULSO	$i = \frac{x_{\max}}{\bar{x}}$	El factor de impulso establece la relación entre la media y el valor máximo.	En fallos asociados a rodamientos se observa un incremento sobre el valor máximo sin entrar en un estado anormal. El factor de impulso es útil en la identificación de fallos incipientes.
FACTOR DE HOLGURA	$h_f = \frac{x_{\max}}{x_p}$ <p>Donde:</p> $x_p = \left(\frac{\sum_{i=1}^N \sqrt{x_i}}{N} \right)^2$	El factor de holgura representa la variación entre el valor máximo y el cuadrado de la sumatoria de las raíces de los datos.	El factor de holgura varia cuando se modifica la dispersión de los datos y se presenta un pico significativo. En presencia de acumulación de energía se observa un incremento de el factor de holgura.

	FÓRMULA	DESCRIPCIÓN	INTERPRETACIÓN
AUTOCORRELACIÓN	$R_{xx}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)x(t+\tau) dt$	Es una medida de relación que tiene una señal con ella misma desfasada en un tiempo Δt	<p>Establece la influencia de los valores en un tiempo sobre los valores en un tiempo futuro, sirve como una herramienta para detectar información determinística que puede estar enmascarada en una señal.</p> <p>Para señales aleatorias el pico máximo se encuentra en $\Delta t = 0$</p>
CORRELACIÓN CRUZADA	$R_{xy}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)y(t+\tau) dt$	Es una medida de relación entre dos señales distintas desplazadas en un tiempo Δt .	En esta se observa las periodicidades similares presentes entre 2 señales físicas. La correlación cruzada es igual a la autocorrelación cuando las dos señales son iguales.
COHERENCIA	$\gamma_{xy}^2 = \frac{ S_{xy} ^2}{S_{xx}S_{yy}}$	Es una medida de relación que tienen 2 señales distintas en el dominio de la frecuencia.	Existe una alta relación entre las señales cuando el valor de la coherencia es 1.

	FÓRMULA	DESCRIPCIÓN	INTERPRETACIÓN
ESPECTRO	$X[k] = \sum_{i=0}^{N-1} x[i] e^{\frac{-j2\pi k}{N}}, k = 0,1,2,\dots,N-1$	Es una variación en el dominio de la frecuencia de la señal. Identifica componentes de periodicidad en la señal.	Identifica frecuencias relacionadas con la operación del sistema y síntomas de fallo del mismo, por lo general estas frecuencias se encuentran como armónico de frecuencia de rotación.
BIESPECTRO	$C_3^x(W_1, W_2) = \sum_{\tau_1=-\infty}^{\infty} \sum_{\tau_2=-\infty}^{\infty} C_3^x(\tau_1, \tau_2) e^{\{-j(W_1\tau_1 + W_2\tau_2)\}}$ <p>para $W_1 , W_2 , W_1 + W_2 \leq \pi$</p>	Interpretación de la relación entre 2 frecuencias presentes en la señal.	La presencia de picos simétricos con valores altos son observados en el contorno como anillos que equidistan entre si, en cantidades iguales a las frecuencias de acoplamiento, aprovechando las propiedades de identificación de no gaussianidades (sistemas no lineales), el biespectro elimina información gaussiana de la señal permitiendo absorber la información no gaussiana.
TRIESPECTRO	$C_4^x(W_1, W_2, W_3) = \sum_{\tau_1=-\infty}^{\infty} \sum_{\tau_2=-\infty}^{\infty} \sum_{\tau_3=-\infty}^{\infty} C_4^x(\tau_1, \tau_2, \tau_3) e^{\{-j(W_1\tau_1 + W_2\tau_2 + W_3\tau_3)\}}$ <p>para $W_1 , W_2 , W_3 , W_1 + W_2 + W_3 \leq \pi$</p>	Interpretación de la relación entre 3 frecuencias acopladas en la señal.	Identificación de acoplamientos cuadráticos de tercer orden visualizados de acuerdo al tamaño de las esferas.

5.2 EXPERIMENTACIÓN

Se simulan los dos estados considerados en la investigación: buen estado y estado de avería ocasionado por la obstrucción de la succión de la succión. De las mediciones tomadas en cada uno de los estados y en los puntos establecidos en la sección 4.4, se establecen los estimadores vibro-acústicos para cada uno de los estados. La simulación considera que el proceso de desgaste es debido solamente por la obstrucción de la línea de succión de la bomba centrífuga; se debe considerar que una obstrucción en la succión produce el fenómeno de la cavitación cuando el $NPSH_d < NPSH_R$ (Figura 20).

5.2.1 Buen estado. El sistema se trabaja en el punto de operación y bajo condiciones normales; esto es, a un porcentaje de apertura del 84% en la válvula de descarga, lo que garantiza un caudal cercano a los 10 L/s, una altura aproximada de 8.7 mca y una eficiencia del 45%. Se hacen 28 réplicas del experimento y se calcula el valor medio. Los valores medios para los estimadores vibro-acústico considerados dentro de la investigación, se ordenan en la Tabla 5.

5.2.2 Mal estado. El sistema se trabaja bajo el estado de cavitación, establecido cuando $NPSH_d < NPSH_R$ (Figura 20). Bajo estas condiciones el sistema entrega un caudal aproximado de 6.3 L/s, una cabeza de bomba cercana a 10 mca y una eficiencia del 37%. Se hacen 28 réplicas del experimento y se calcula el valor medio. Los valores medios para los estimadores vibro-acústico considerados dentro de la investigación, se ordenan en la Tabla 5.

En la sección 7.5 se desarrolla un análisis mas detallado de los estimadores vibro-acústicos calculados y presentados en la Tabla 5.

Tabla 5. Estimadores vibro-acústicos: buen estado - mal estado

Estimador Vibro-acústico	Buen Estado		Mal Estado	
	Motor	Bomba	Motor	Bomba
Media	6.1441	2.4355	4.9961	2.3331
RMS	6.2637	2.5446	5.0964	2.4391
Pico	12.231	4.7782	9.8857	4.523
Kurtosis	6.0364	2.9916	5.8799	2.961
Sesgo	0.038516	-0.08024	0.00040131	-0.051502
D.Standard	1.1832	0.7337	0.96081	0.70912
Factor Forma	1.0219	1.0457	1.024	1.0461
Factor Cresta	1.9891	1.8885	2.0322	1.8584
Factor Impulso	2.0346	1.9758	2.0856	1.9445
Factor Holgura	2.0618	2.0315	2.1178	1.9989
Frecuencia Rice	0.00018995	0.00017057	0.00018978	0.0001767
Ind Armonico	12.05	7.8377	12.219	8.4451
Nivel Ruido	-	-	-	-
Amp XCF	5.4391	5.4391	4.7706	4.7706
Frecuencia XCF	1.0047	1.0037	1.0049	1.0042
Fase	0	0	0	0
Delta XCF	0	0	0	0
Tiempo XCF	0.99531	0.99632	0.99512	0.99585
Promedio Coherencia	0.071615	0.071615	0.15346	0.15346
Datos sup90%	0.42326	0.42326	0.42034	0.42034
Global RMS	0.090046	0.055377	0.073956	0.053717
max Amplitud	0.23605	0.29225	0.19823	0.31116
max Frecuencia	0.00018234	5.6076e-5	0.00023678	4.1689e-5
f1 Bspec	-556	435.33	-625.71	128.57
f2 Bspec	-2859.3	-1040	-2236.4	-1052.1
A ASPEC	-	-	-	-
f1 Bcohe	-1109.3	-277.33	-880	-1508.6
f2 Bcohe	-2154.7	-1493.3	-2114.3	-2148.6
A Bcohe	0.91074	0.50016	0.82086	0.40363
f1 Tspec	15.167	10	13.5	29.964
f2 Tspec	-0.00036011	-0.00085449	-0.00034223	-0.00061253
f3 Tspec	-0.00063273	-0.00091756	-0.00065177	-0.00086539
A Tspec	-	-	-	-
Time WV	4.5705e+005	4.5841e5	5.7893e+5	5.2901e+5
Frec WV	0	0	0	0
Tiempo Wavelet	0.43343	0.40482	0.35861	0.37392
Scala Wavelet	32	32	32	32

Se debe anotar que las señales de aceleración están dadas en unidades del sistema internacional, esto es $[m/s^2]$. Algunos estimadores no figuran en la Tabla 5, debido a que la naturaleza de su matemática arroja resultados imaginarios.

6 MÓDULO DE VIGILANCIA DE LA CONDICIÓN

En este módulo se evalúa la condición de estado mediante el cálculo de indicadores de la severidad de la vibración de acuerdo a normas técnicas. Además, la evaluación se complementa con la reconstrucción de las curvas de la bomba y del sistema de bombeo, como son, cabeza, eficiencia y pérdidas.

La bomba Nowa 5016 del banco experimental cumple con la norma VDI 2056 e ISO 5199 clase K, de acuerdo a las especificaciones dadas por el fabricante. El motor de la bomba es de 3 hp de potencia (aproximadamente 2.24 kW), por lo tanto la bomba se clasifica en la norma VDI 2056 en el grupo K correspondiente a máquinas pequeñas con consumo de potencia menor a 15 kW (Sterling,25,2004).

Los límites del nivel de vibración de la bomba del banco experimental según la norma VDI 2056 se muestran en la Tabla 6. Como puede observarse, de acuerdo con la norma, la máxima velocidad RMS de vibración permitida en la bomba es de 4,5 mm/s.

Tabla 6. Límites del nivel de vibración de la bomba del banco experimental según la norma VDI 2056

Velocidad RMS de la vibración [mm/s]	Concepto del nivel de vibración
< 0,7	Bueno
0,7 – 1,8	Permitido
1,8 – 4,5	Todavía permitido
> 4,5	No permitido

La medición de vibraciones en el banco experimental se hace con acelerómetros marca Kistler (ver sección 3.1.6), los cuales miden el nivel de vibración en

unidades de aceleración [m/s²]. Dicha señal de vibración se obtiene en el dominio del tiempo, se procesa en Labview® 7.0 y se halla el espectro vibratorio en unidades de aceleración RMS. Dicho espectro se puede obtener en un archivo con los valores de aceleración y frecuencia. Para verificar que la bomba está cumpliendo con la norma VDI 2056 es necesario convertir las medidas de vibración a unidades de velocidad RMS [mm/s]. La expresión (30) es la fórmula para hacer dicha conversión.

$$V_0 = \frac{159.2 A_0}{f_v} \quad (30)$$

Saavedra,1-5,1997.

Donde:

V_0 : Velocidad RMS de la velocidad de la vibración [mm/s].

A_0 : Aceleración RMS de la aceleración de la vibración [m/s²].

f_v : Frecuencia de la vibración [Hz].

Los valores de velocidad RMS de la vibración, calculados del espectro vibratorio por medio de la expresión (30)se utilizan para calcular el valor RMS global de la vibración por medio de: (Saavedra,2-19,1998).

$$V_{RMS} = \sqrt{(V_{rms})_1^2 + (V_{rms})_2^2 + \dots (V_{rms})_n^2} \quad (31)$$

Saavedra, 2-19, 1998.

Donde:

V_{RMS} : Valor de velocidad rms global o valor de velocidad rms de la vibración [mm/s].

$(V_{rms})_n$: Valores rms calculados del espectro vibratorio [mm/s].

6.1 EXPERIMENTACIÓN

El nivel de vibraciones en la bomba se evalúa de acuerdo con la norma VDI 2056. Para la evaluación se toman los valores de amplitud de aceleración RMS [m/s^2] y se llevan a unidades de velocidad RMS [mm/s]. Los valores de velocidad RMS se utilizan para calcular la velocidad RMS global de la vibración por medio de la expresión (63).

La velocidad RMS de la vibración de las mediciones realizadas en la carcasa de la bomba, trabajando el sistema bajo condiciones normales de operación, presenta un valor de $0,49 \mu\text{m/s}$. De acuerdo con la norma VDI 2056, la velocidad de la vibración de la bomba está en un nivel bueno.

7 MÓDULO DE LA EVALUACIÓN DE ESTADO

A partir de (43) se describen las relaciones que se pueden encontrar dentro del modelo y el tratamiento con respecto a parámetros con ruido adaptativo. Las relaciones son:

- Parámetros de diagnóstico – Propiedades de estado:

$$Y_j = f_j(X_1, X_2, \dots, X_m, \beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_i), + N \quad (32)$$

- Propiedades de estado – Parámetros de diagnóstico:

$$X_m = g_m(y_1, y_2, \dots, \beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k), + N \quad (33)$$

- Parámetros de diagnóstico – Medida de explotación

$$Y_l = \phi_l(l_p, \beta_o, \beta_1, \dots, \beta_L) + N \quad (34)$$

Donde:

$Y = \{y_1, y_2, \dots, y_J\}$ Parámetros de diagnóstico

$X = \{X_1, X_2, \dots, X_m\}$ Propiedades de estado de la bomba centrífuga.

β = Coeficientes de regresión.

L_p = Medida de explotación (tiempo de vida, horas de trabajo, etc)

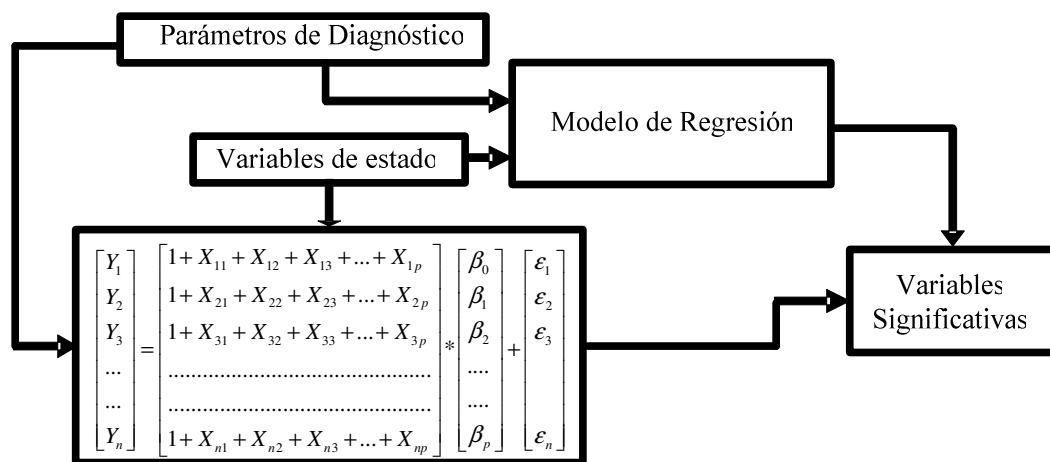
N = ruido o residuos del objeto.

Las anteriores son una descripción vectorial del objeto, los flujos de entrada, alimentación, control y ruido, y los de salida energética: operación y residuales, llevan a una descripción inmediata de las posibles relaciones entre variables.

7.1 MODELO REGRESIVO

Mediante el diagrama de flujo de la Figura 18 se muestra como funciona el modelo regresivo de diagnóstico que el autor considera en el estudio de la bomba centrífuga.

Figura 18. Modelo regresivo de diagnóstico.



(ZOLTOWSKI, 1997,62)

Los parámetros de diagnóstico entran a la ecuación de regresión como variable dependiente mientras que las variables de estado entran como variables independientes, a partir de esto se inicia el análisis de regresión, que termina mostrando cuales parámetros de diagnóstico Y, explican mejor los parámetros de estado X.

7.2 EXPERIMENTO PASIVO

El experimento pasivo es un procedimiento que complementa el modelo regresivo en la explicación de los parámetros de estado por medio de los parámetros de diagnóstico. Se presenta el algoritmo de reducción de información basado en el algoritmo BEDIND:

- Constante de precisión (adimensional):

$$s = \frac{s_i}{p_i} \quad (35)$$

donde p_i es una cantidad que normaliza el parámetro de salida s_j que se calcula para la bomba centrífuga.

Valor medio de cada parámetro de salida s_j , con n muestras:

$$s_o = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n s_{ij} \quad (36)$$

- Sensibilidad de cada parámetro de salida:

$$\varpi = \frac{\max(s_j) - \min(s_j)}{s_o} \quad (37)$$

- Dispersión de cada parámetro de salida:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (s_{ij} - s_o)^2} \quad (38)$$

- Determinante de descomposición económica vector de parámetros de diagnóstico:

$$\det K = \prod_{i=1}^l \lambda_i \text{ donde } \lambda_i \text{ son valores propios de } S. \quad (39)$$

- Información redundante en vector de parámetros de diagnóstico:

$$R_r = \lg \sqrt{\frac{\prod_{i=1}^l \sigma_{x_i, x_i}^2}{\prod_{i=1}^l \lambda_i}} \quad (40)$$

- Reservas de variabilidad del experimento:

$$ZZP = \text{tr}K = \sum_{i=1}^l \lambda_i \quad (41)$$

- Medida de agrupación (Mahalanobis):

$$K_M(\Theta_i) = \sum_{i=1}^m \frac{1}{1 + \lambda_i(\Theta_i)} \quad (42)$$

Criterios para reducir el número de parámetros de acuerdo a la metodología BEDIND: Se deben descartar componentes de baja sensibilidad (ϖ), bajo valor propio (λ), bajo valor del determinante ($\det|K|$), bajas reservas de variabilidad (ZZP), alta redundancia de información (R_r).

El proceso se debe realizar en forma adaptativa en un ciclo cerrado, reduciendo la matriz de parámetros de salida cada iteración.

7.3 VALOR LÍMITE

Para que el estado técnico se pueda clasificar en “estado bueno” o “estado de avería”, en el caso más general, es necesario definir los valores límite de los parámetros de diagnóstico. Se proponen tres métodos para calcular el valor límite.

7.3.1 Método que considera el nivel admisible de reparaciones innecesarias. Para definir el valor límite se determina el valor (probabilidad) admisible de reparaciones innecesarias A:

$$A = P(z) \cdot P(y > y_g) \quad (43)$$

a partir de la disponibilidad sintomática basada en la condición $P(z)$ y la probabilidad de sobrepasar el valor límite $P(y > y_g)$:

$$P(z) = \frac{\bar{T}_z}{\bar{T}_z + \bar{T}_n} \quad (44)$$

donde \bar{T}_z es el tiempo medio en buen estado y \bar{T}_n es el tiempo promedio en mal estado de un grupo de bombas observado.

El valor límite y_g del parámetro de diagnóstico está dado por:

$$y_g = \bar{y} + \sigma_y \sqrt{\frac{P(z)}{2A}}, \quad \text{si } y_g > \bar{y} \quad (45)$$

$$y_g = \bar{y} - \sigma_y \sqrt{\frac{P(z)}{2A}}, \quad \text{si } y_g < \bar{y} \quad (46)$$

donde \bar{y} es valor medio y σ_y la desviación estándar del parámetro de diagnóstico.

Los valores de $P(z)$ y A pueden determinarse experimentalmente, sin embargo, algunos autores como Cempel y Zoltowky recomiendan valores de $P(z) = 0,85$ y $A = 0,05$, que serán considerados para la validación de los modelos.

7.3.2 Método apoyado en el valor del parámetro de diagnóstico. El valor límite se determina con base en el valor medio conocido en el instante antes del estado de avería. El valor medio se puede establecer de tres maneras:

- A partir de la curva de vida de un grupo de bombas centrífugas.
- Como el valor medido del parámetro de diagnóstico en un conjunto de bombas antes de la reparación principal.
- Como el parámetro de diagnóstico medido en bombas defectuosas antes de la avería.

El valor límite y_g se obtiene restando la desviación estándar del parámetro de diagnóstico σ_a a su valor medio antes de la avería y_a :

$$y_g = y_a + \sigma_a, \text{ si } y_g > y_a \quad (47)$$

$$y_g = y_a - \sigma_a, \text{ si } y_g < y_a \quad (48)$$

7.3.3 Método apoyado en la distribución del parámetro de diagnóstico. Se establece que el parámetro de diagnóstico observado en un grupo de bombas centrífugas se distribuye normalmente; por lo tanto, los valores alejados más de tres desviaciones estándar ($3\sigma_y$) de la media del parámetro de diagnóstico son valores atípicos; por lo tanto, el valor límite está dado por:

$$y_g = \bar{y} + 3\sigma_y, \text{ si } y_g > \bar{y} \quad (49)$$

$$y_g = \bar{y} - 3\sigma_y, \text{ si } y_g < \bar{y} \quad (50)$$

7.4 MODELO PROBABILISTICO

La conclusión en el diagnóstico es la principal etapa para elaborar la decisión en el proceso de diagnóstico.

Cuando hay un alto nivel de ruido la decisión final del estado del artefacto puede ser dada en categoría de probabilidades del estado servible o inservible. En las categorías de densidad de probabilidad del modelo probabilístico de diagnóstico para un parámetro se puede escribir de la siguiente forma:

$p(y/z)$: densidad de probabilidad de buen estado para el parámetro de diagnóstico y ;
 $p(y/n)$: densidad de probabilidad de estado de avería para el parámetro de diagnóstico y .

Definiendo estos valores para un parámetro concreto y se puede obtener:

$$P(y/z) = \int_{-\infty}^y p(y_k/z) dy_k ; \quad P(y/n) = \int_{-\infty}^y p(y_k/n) dy_k \quad (51)$$

De la condición de probabilidad total del parámetro y a sobrepasar el valor límite:

$$\begin{aligned} P(y) &= p(y/z)p(z) + p(y/n)p(n) \\ p(z) + p(n) &= 1 \end{aligned} \quad (52)$$

La decisión de estado técnico, se puede formular utilizando la regla de Bayes, definiendo el umbral de reconocimiento: (Natke,174,1997)

$$P(W/y) = P(W) \frac{P(y/W)}{P(y)} = \frac{P(W)P(y/W)}{P(z)P(y/z) + P(n)P(y/n)} \quad (53)$$

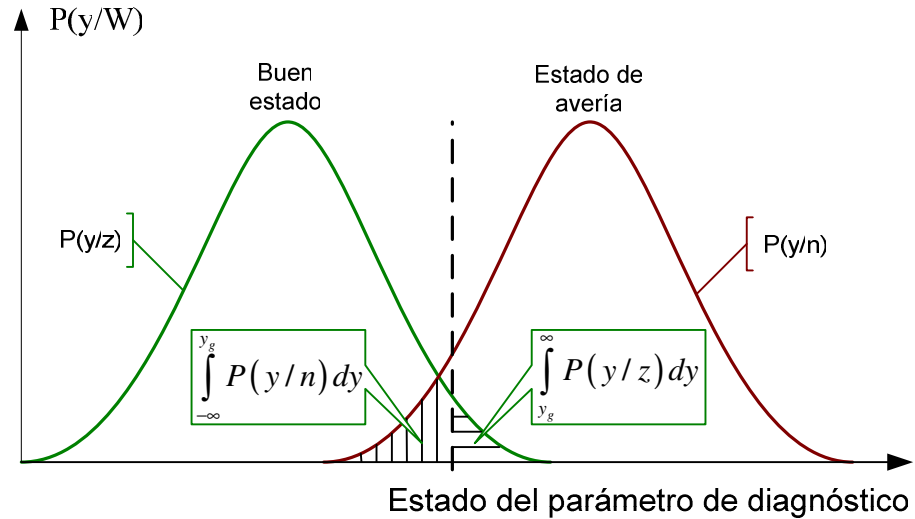
Teniendo de entrada la información de $P(W)$ y definiendo $P(y/W)$ de la medición del valor del parámetro de diagnóstico y , se puede calcular la probabilidad condicionada de buen estado $P(y/z)$ y estado de avería $P(y/n)$. Si la probabilidad calculada supera el umbral de reconocimiento $P(W/y) > P(W)$, para $W = [z,n]$ entonces el valor y define el estado de mayor probabilidad:

$$P(z/S) \stackrel{\geq}{\leq} P(n/S) \quad (54)$$

El modelo probabilístico de diagnóstico admite la forma de concluir con la ayuda del valor límite del síntoma y_g determinado con los métodos de la sección 7.3, después de definir el riesgo de la decisión del diagnóstico.

En la Figura 19 se muestra el diagnóstico como decisión estadística para un parámetro. El modelo probabilístico en forma de densidad de probabilidad del parámetro de diagnóstico en buen estado $P(y/z)$ y avería $P(y/n)$ permite calcular (de acuerdo a la Figura 19):

Figura 19. Decisión del estado técnico



- Probabilidad de acierto al evaluar el buen estado:

$$P(z) \cdot \int_{-\infty}^{y_g} P(y/z) dy = P(y)P(y < y_g / z) \quad (55)$$

- Probabilidad de falsa alarma o reparación innecesaria, que resulta de la evaluación errónea del buen estado:

$$P(z) \cdot \int_{y_g}^{\infty} P(y/z) dy = P(z)P(y > y_g / z) \quad (56)$$

- Probabilidad de no detectar el estado de avería:

$$P(n) \cdot \int_{-\infty}^{y_g} P(y/n) dy = P(n)P(y < y_g / n) \quad (57)$$

- Probabilidad de acierto en la evaluación de un estado de avería:

$$P(n) \cdot \int_{y_g}^{\infty} P(y/n) dy = P(n)P(y > y_g / n) \quad (58)$$

7.5 EXPERIMENTACIÓN

El experimento que se desarrolla para establecer las pautas para la evaluación del estado técnico del sistema de bombeo en un determinado instante de tiempo; consta de tres pruebas para recolectar datos que alimenten los modelos descritos en el capítulo. La primera prueba consiste en simular las condiciones normales (buen estado), la segunda, busca simular un mal estado, y en la tercera se reconstruye paulatinamente la vida del sistema partiendo del buen estado hasta el estado de avería, con el propósito para generar el vector de parámetros de salida necesario para la regresión.

7.5.1 Buen estado. El sistema se trabaja en el punto de operación y bajo condiciones normales; esto es, a un porcentaje de apertura del 84% en la válvula de descarga, lo que garantiza un caudal cercano a los 10 L/s, una altura aproximada de 8.7 mca y una eficiencia del 45%. Se hacen 60 réplicas del experimento, se toman miden las variables establecidas en la sección 2.1, se

calculan los estimadores vibro-acústicos y finalmente se verifica la normalidad (Kolmogorov-Smirnov) de los datos.

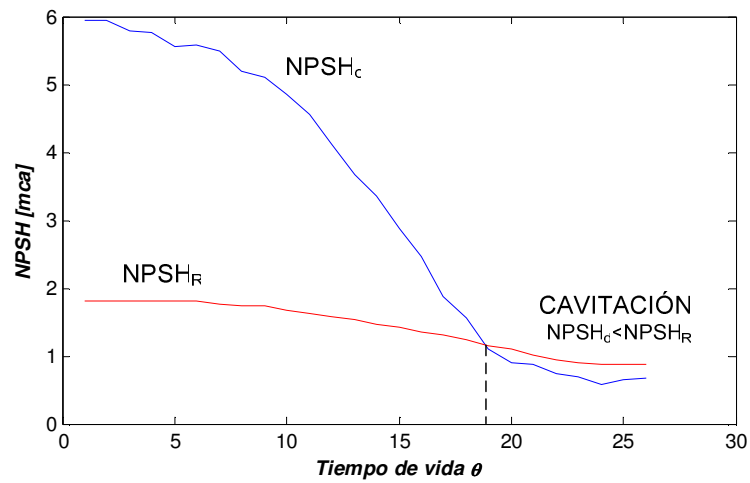
7.5.2 Mal estado. El sistema se trabaja bajo el estado de cavitación, establecido cuando $NPSH_d < NPSH_R$ (Figura 20). Bajo estas condiciones el sistema entrega un caudal aproximado de 6.3 L/s, una cabeza de bomba cercana a 10 mca y una eficiencia del 37%. Se hacen 60 réplicas del experimento, se toman mediciones de las variables establecidas en la sección 2.1, se calculan los estimadores vibroacústicos y finalmente se verifica la normalidad (kolmogorov-Smirnov) de los datos.

7.5.3 Vida del sistema. Se simula la vida del sistema de bombeo experimental, considerando que el proceso de desgaste se debe solamente a la paulatina obstrucción de la línea de succión de la bomba centrífuga; se debe tener en cuenta que una obstrucción en la succión produce el fenómeno de la cavitación cuando el $NPSH_d < NPSH_R$ (Figura 20).

La obstrucción en la succión se controla mediante una válvula que permite restringir el flujo. El proceso de obstrucción se inicia desde un 0% (buen estado) hasta un 70% donde la cavitación está plenamente desarrollada (mal estado).

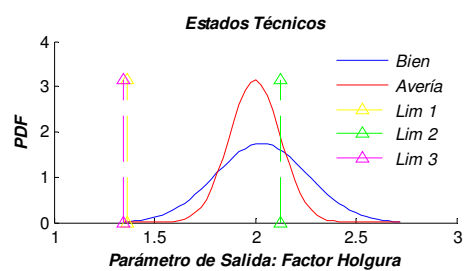
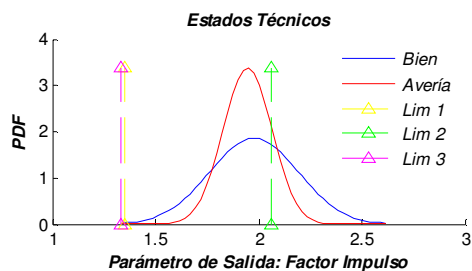
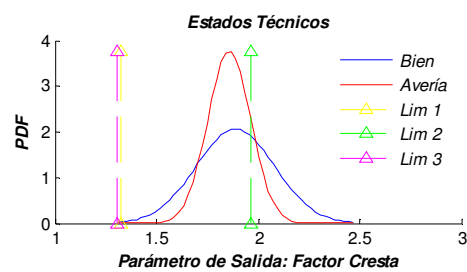
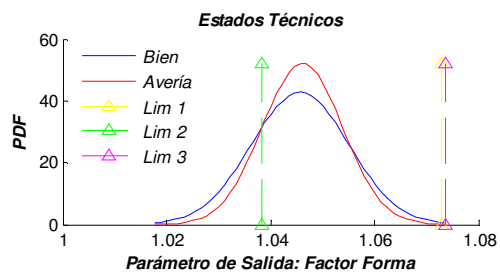
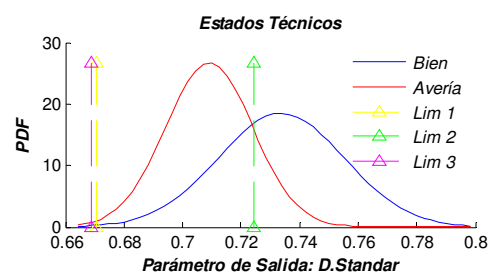
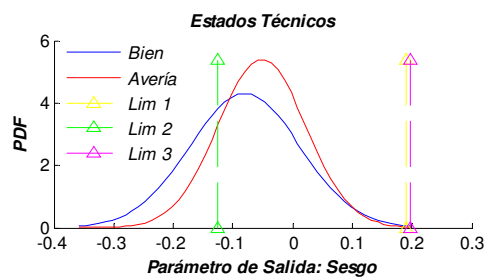
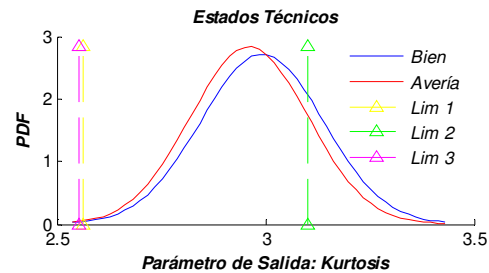
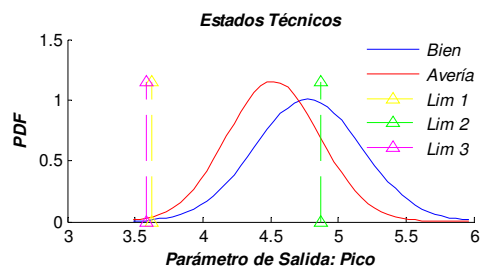
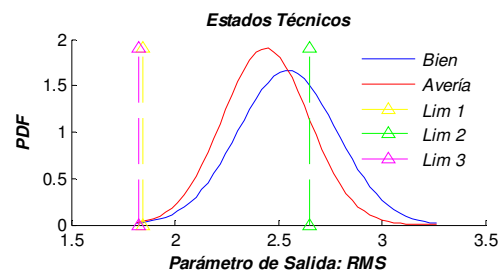
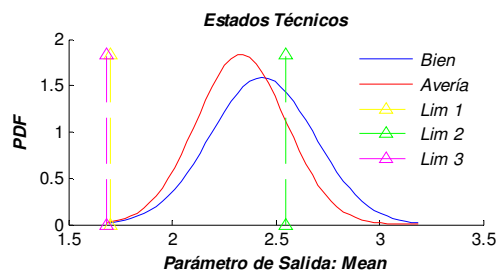
Las señales de vibración se toman de los puntos seleccionados en la sección 4.3 y a partir de estas, se obtienen los estimadores vibro-acústicos que conforman el vector de parámetros de diagnóstico Y.

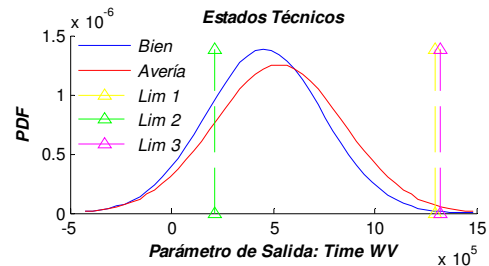
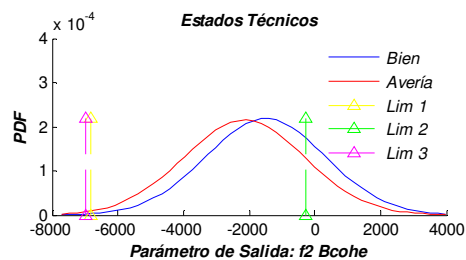
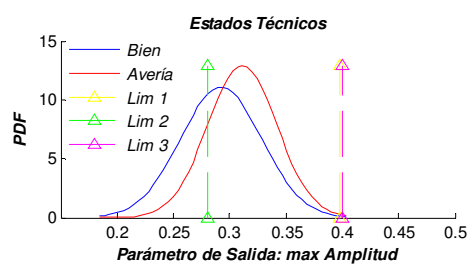
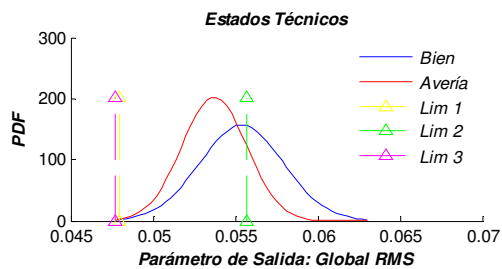
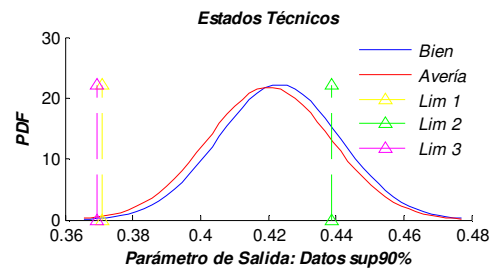
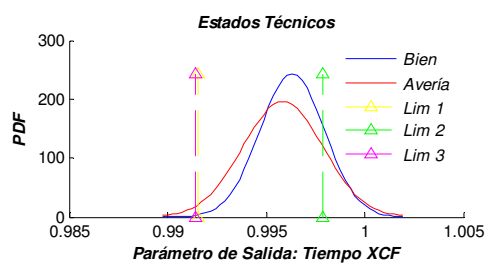
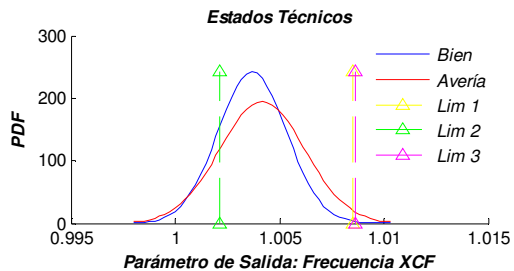
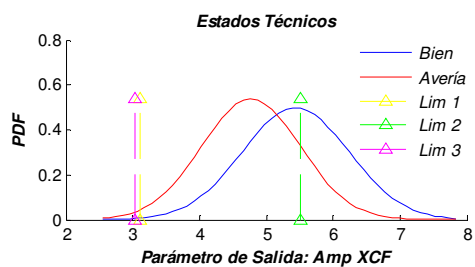
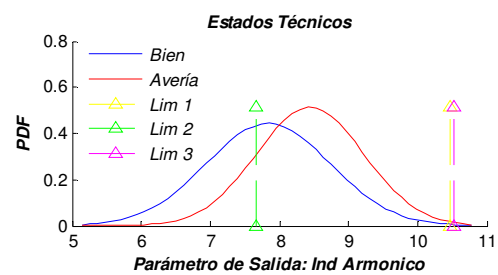
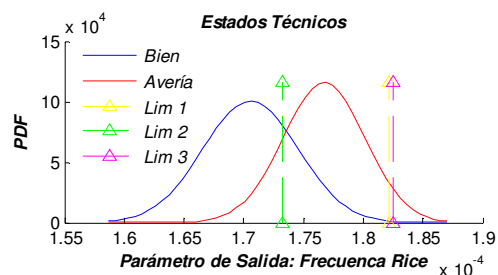
Figura 20. Aparición del fenómeno de cavitación.



7.5.4 Distribución probabilística y valores límite de los estimadores según el estado técnico. A partir de los datos estadísticos tomados experimentalmente en cada uno de los estados, se calculan las funciones de distribución de probabilidad (PDF) y se calculan los valores límite por cada uno de los tres métodos descritos en la sección 7.3. Los resultados se grafican según para los puntos de medición seleccionados: en carcasa de bomba y motor.

7.5.4.1 Distribuciones en la carcasa de la bomba. Cada uno de los gráficos que se presentan a continuación contiene las distribuciones de probabilidad para el buen estado y estado de avería, de acuerdo a los parámetros del experimento. Dadas las condiciones de los modelos de diagnóstico trabajados, se consideran solamente aquellos parámetros que pasan la prueba de normalidad Kolmogorov-Smirnov; otros parámetros, como el biespectro, no se incluyen porque presentaron resultados imaginarios:





En los gráficos obtenidos para los parámetros de diagnóstico (carcasa bomba) que aprobaron el test de normalidad, se puede detectar por simple inspección que en muchos casos, por ejemplo el factor de forma, las campanas gaussianas que representan los estados bueno y malo no se apartan lo suficiente la una de la otra como para diferenciar claramente los dos estados. Este tipo de comportamiento observado dificulta la tarea de conclusión del diagnóstico. Parámetros como la desviación estándar y la frecuencia Rice, presentan un mejor comportamiento desde este punto de vista.

7.5.4.2 Valores límite para parámetros de salida en la carcasa de la bomba. Los valores límite estimados (sección 7.3) para la mayoría de las funciones de distribución graficadas en la sección 7.5.4.1, no permiten separar el estado bueno y el estado de avería. Se parte de la premisa que los valores que puede tomar un parámetro en el tiempo de vida pertenecen al intervalo limitado por los valores de estado bueno y estado de avería; es por esto que se espera que los valores límite del parámetro de diagnóstico pertenezcan a dicho intervalo. En la mayoría de las gráficas se observa que los valores límite están por fuera del intervalo limitado por las medianas de ambos estados; solo para los parámetros: desviación estándar y frecuencia Rice, los valores límite estimados por el segundo método (7.3.2) están dentro del intervalo. Los métodos 1 y 3 no aplican para ninguno de los parámetros graficados. En gráficos como el de las distribuciones de la kurtosis y el factor cresta, se observa que ninguno de los límites calculados se ubica entre las medianas (valores máximos de las PDF) de los estados bueno y de avería. Mediante este análisis, se descartan las distribuciones cuyos valores límite se ubiquen fuera del intervalo mencionado.

Los estimadores para las mediciones de vibración en la carcasa de la bomba, que se consideran para la evaluación del estado técnico se ordenan en la Tabla 7. Para cada parámetro se establecen los valores límite que se tendrán en cuenta:

Tabla 7. Parámetros de salida y valores límite seleccionados para la evaluación de estado – Punto de medición bomba.

Estimador Vibro-acústico	Valor Límite		
	Método 1	Método 2	Método 3
D. estándar	-	0,724	-
Frecuencia Rice	-	$1,73 \times 10^{-4}$	-

7.5.4.3 Probabilidades para la toma de decisiones con respecto a los parámetros de salida – Punto de medición bomba. La Tabla 8 presenta las probabilidades calculadas a partir de las funciones de distribución graficadas en la sección 7.5.4.1 para los estimadores vibro-acústicos de las mediciones tomadas en la carcasa de la bomba. Las probabilidades calculadas se apoyan en la teoría expuesta en la sección 7.4.

Tabla 8. Probabilidades para toma de decisiones. Punto de medición bomba.

Estimador Vibro-acústico	Probabilidades			
	P1	P2	P3	P4
D. Standar	0,6040	0,2960	0,0159	0,0841
Frecuencia Rice	0,6759	0,1629	0,0159	0,0841

donde:

P1: probabilidad de acertar en la evaluación de un buen estado.

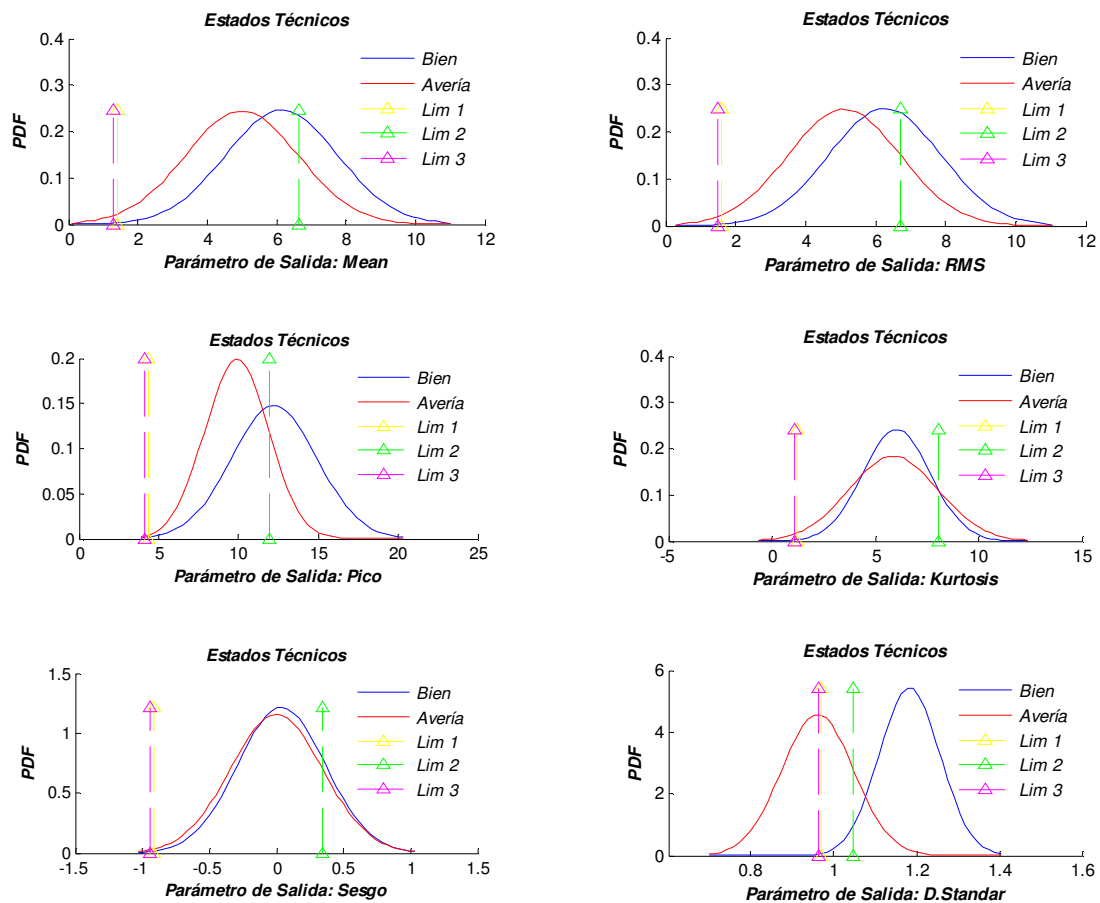
P2: probabilidad de que se presente una falsa alarma.

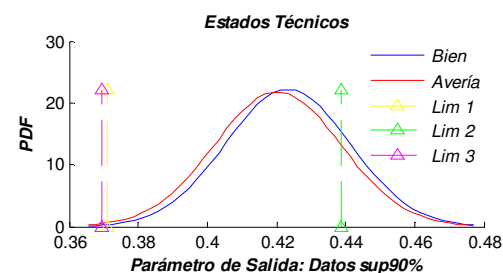
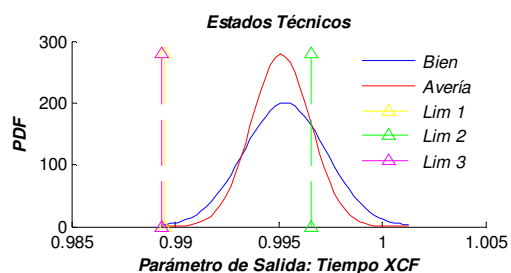
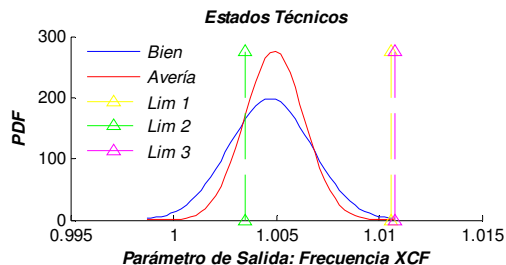
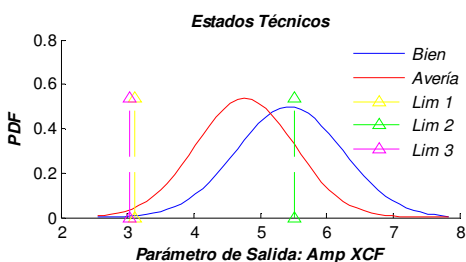
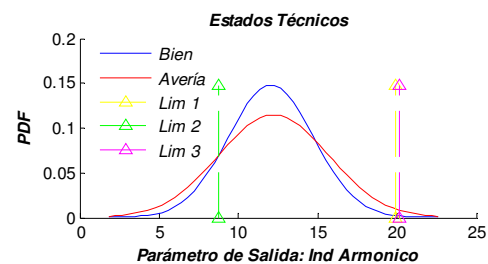
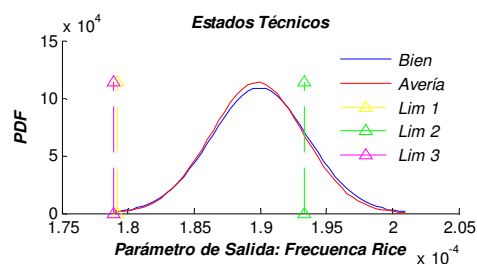
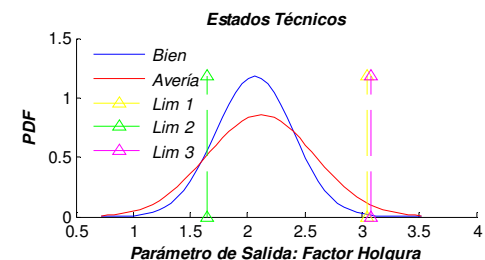
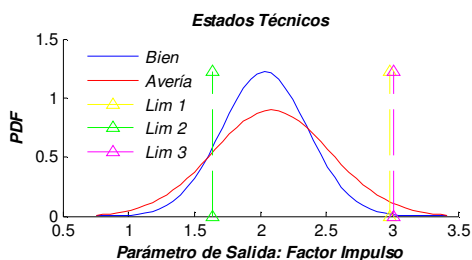
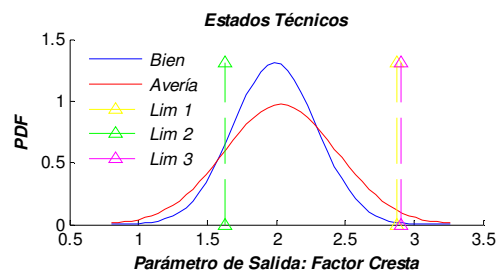
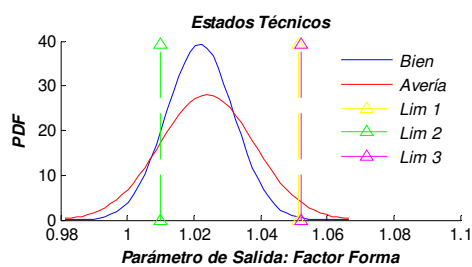
P3: probabilidad de no detectar un estado de avería.

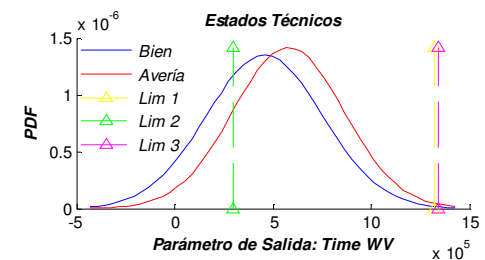
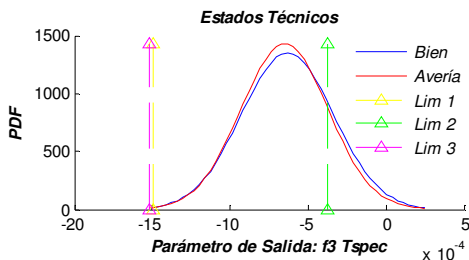
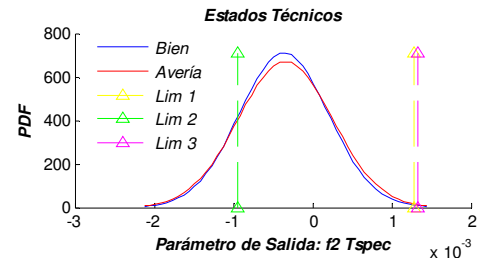
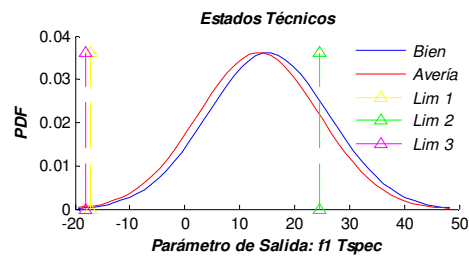
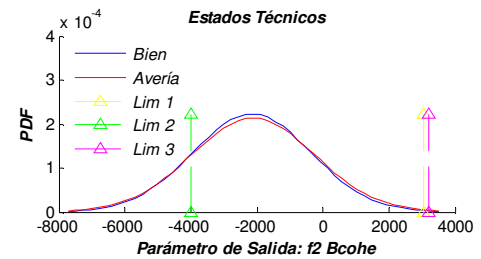
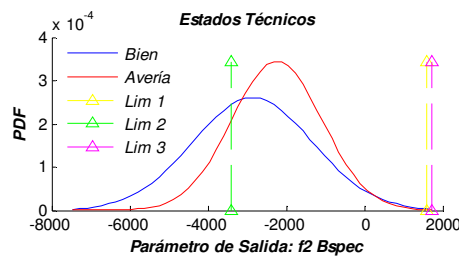
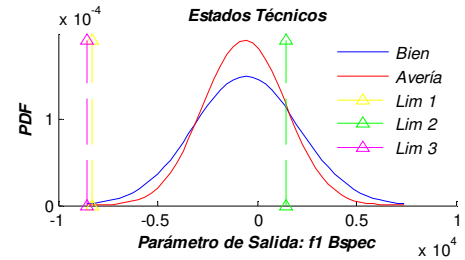
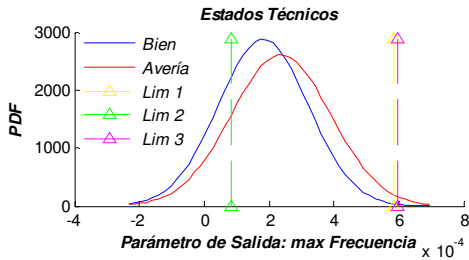
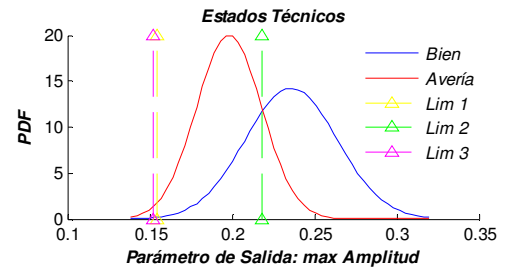
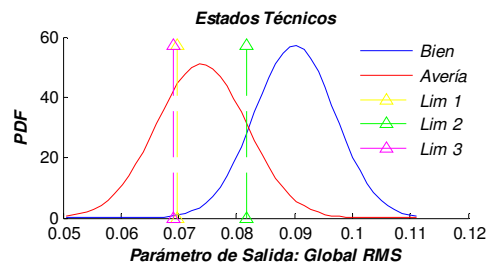
P4: probabilidad de acertar en la evaluación de un mal estado.

De la Tabla 8 se puede concluir que el estimador vibro-acústico que permite evaluar un buen estado del sistema con mayor certeza es el indicador armónico; es indiferente evaluar un mal estado por medio de cuales quiera de los estimadores vibro-acústicos listados en la Tabla 8, debido a que se empleó el mismo método para calcular sus valores límite.

7.5.4.4 Distribuciones en el motor. Cada uno de los gráficos que se presentan a continuación contiene las distribuciones de probabilidad para el buen estado y estado de avería, de acuerdo a los parámetros del experimento. Dadas las condiciones de los modelos de diagnóstico trabajados, se consideran solamente aquellos parámetros que aprueban el test de normalidad Kolmogorov-Smirnov; otros parámetros, como el biespectro, no se incluyen porque presentan resultados imaginarios:







En los gráficos obtenidos para algunos de los parámetros de salida en el punto de medición ubicado sobre el motor, presentan comportamientos similares a los

detectados en el punto de medición sobre la bomba. Se puede observar que no todos parecen aportar información suficiente para la conclusión del diagnóstico debido a las posiciones de las distribuciones para el estado bueno y el estado de avería como se aprecia en la gráfica para la media y el sesgo, entre otras.

7.5.4.5 Valores límite para parámetros de salida en el motor. Para todas las funciones de distribución graficadas en la sección 7.5.4.4, los valores límite calculados por los métodos 1 y 3, no aplican para la distinción del estado de avería. En el gráfico de distribuciones para la media o el sesgo, se observa como ninguno de los límites calculados se ubica entre las medianas (valores máximos de las PDF) de los estados bueno y de avería. Con base en esta hipótesis, se descartan las distribuciones cuyos valores límite se ubiquen fuera del intervalo mencionado.

Los estimadores vibro-acústicos de la medición de vibración en el motor, que serán considerados para la evaluación del estado técnico se ordenan en la Tabla 9. Para cada parámetro se establecen los valores límites calculados por el método 2 (sección 7.3.2), que se tendrán en cuenta para la posterior evaluación del estado técnico:

Tabla 9. Parámetros de salida y valores límite seleccionados para la evaluación de estado – Punto de medición motor.

Estimador	Valor Límite		
	Método 1	Método 2	Método 3
Vibro-acústico			
D.Standar	-	1,05	-
Global RMS	-	0,22	-
Max. Amplitud	-	0,082	-

7.5.4.6 Probabilidades para la toma de decisiones con respecto a los parámetros de salida – Punto de medición motor. La Tabla 10 presenta las probabilidades calculadas a partir de las funciones de distribución graficadas en la sección 7.5.4.4

para los estimadores vibro-acústicos de las mediciones tomadas en el motor. Las probabilidades calculadas se apoyan en la teoría expuesta en la sección 7.4.

Tabla 10. Probabilidades para toma de decisiones. Punto de medición motor.

Estimador Vibro-acústico	Probabilidades			
	P1	P2	P3	P4
D.Standar	0,8706	0,0294	0,0159	0,0841
Global RMS	0,7939	0,1061	0,0159	0,0841
Max. Amplitud	0,6646	0,2354	0,0159	0,0841

donde:

P1: probabilidad de acertar en la evaluación de un buen estado.

P2: probabilidad de que se presente una falsa alarma.

P3: probabilidad de no detectar un estado de avería.

P4: probabilidad de acertar en la evaluación de un mal estado.

De la Tabla 10 se puede concluir que el estimador vibro-acústico que permite evaluar un buen estado del sistema de bombeo con mayor certeza es la desviación estándar. La certeza de diagnosticar un estado de obstrucción en la succión de la bomba es la misma para todos los estimadores vibro-acústicos listados en la Tabla 10, debido a que se empleó el mismo método para calcular sus valores límite.

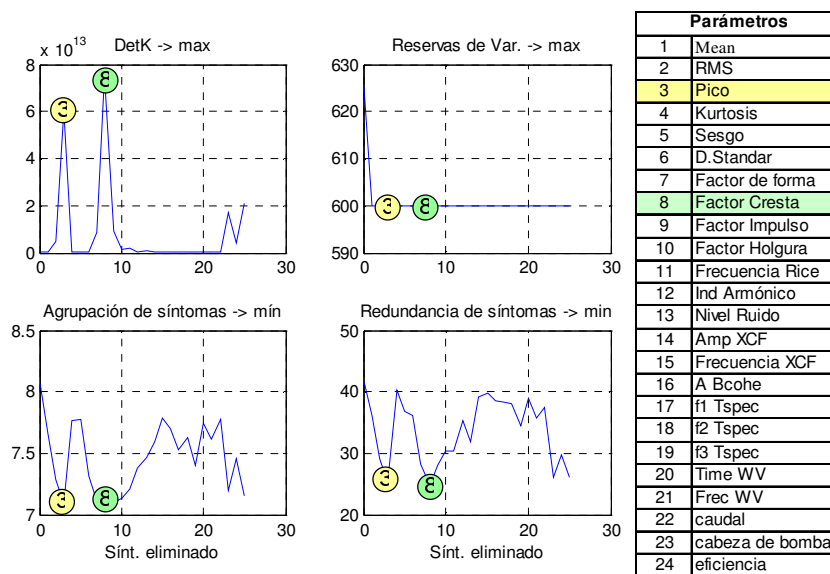
7.5.5 Reducción de información (Experimento pasivo). Con el vector de parámetros de diagnóstico generado en la sección 7.5.3, se procede a ejecutar el algoritmo BEDIND para descartar los parámetros que no estén aportando información relevante a las tareas del diagnóstico. Del vector de parámetros Y, se eliminan inicialmente aquellos que se comportaron constantemente en el tiempo de vida, y aquellos que contienen valores imaginarios. Como resultado, se obtienen los parámetros: Mean, RMS, Pico, Kurtosis, Sesgo, D.Standar, Factor de

forma, Factor Cresta, Factor Impulso, Factor Holgura, Frecuencia Rice, Ind Armónico, Nivel Ruido, Amp XCF, Frecuencia XCF, A Bcohe, f1 Tspec, f2 Tspec, f3 Tspec, Time WV, Frec WV, caudal, cabeza de bomba, eficiencia.

Para seguir el algoritmo, se eliminó un parámetro a la vez por ciclo, para detectar aquellos que deben ser eliminados de acuerdo a los criterios establecidos en la sección (7.2).

En la Figura 21 se muestran los parámetros no aportan información pertinente a las tareas de diagnóstico; estos son el valor pico (3), y el factor cresta (8). Los parámetros se eliminaron de acuerdo a los criterios de maximizar el determinante, y minimizar los valores de agrupación y redundancia. Se obtuvo el siguiente resultado:

Figura 21. Reducción de la información.



Los resultados listados en la Tabla 11 corroboran el proceso de reducción de parámetros desarrollado. El determinante pasó de un valor cercano a los 10×10^{13} a un valor de $2,9 \times 10^{15}$, las reservas de información pasaron de un valor de

cercano a 600 a un valor de 575, la agrupación de parámetros pasó de 7,2 a 6,2 y la redundancia pasó de 25 a 16,7.

Tabla 11. Resultados del experimento pasivo.

Cantidad de Evaluación	Valor
Determinante (DetK)	$2,9 \times 10^{15}$
Reservas (ZZP)	575
Agrupación (Km)	6,18

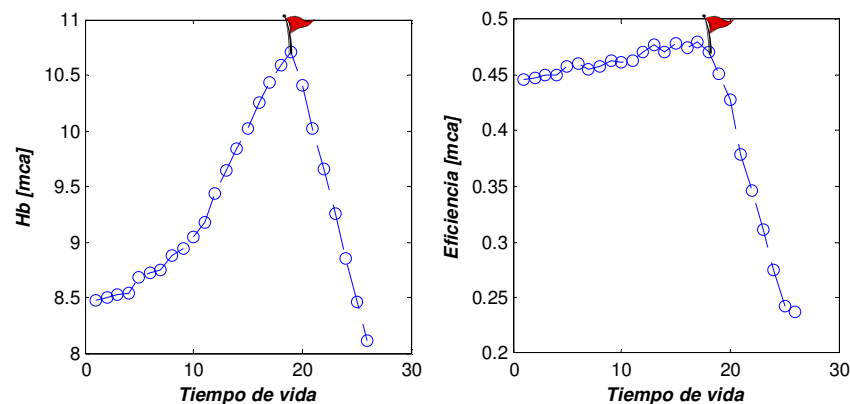
7.5.6 Modelo regresivo. Los datos de origen que alimentan el modelo de diagnóstico son los correspondientes a los parámetros seleccionados en la sección 7.5.5 que además cumplan con la condición $R^2 > 0,8$. La Tabla 12 contiene los valores R^2 calculados para cada parámetro de diagnóstico con respecto al parámetro de estado: obstrucción en la succión:

Tabla 12. Valores de R^2 para los parámetros de diagnóstico.

Parámetros		R^2 Bomba	R^2 Motor
1	Mean	0,06	0,00
2	RMS	0,22	0,00
3	Pico	0,09	0,22
4	Kurtosis	0,00	0,32
5	Sesgo	0,16	0,00
6	D.Standar	0,36	0,00
7	Factor de forma	0,00	0,13
8	Factor Cresta	0,02	0,38
9	Factor Impulso	0,00	0,16
10	Factor Holgura	0,01	0,36
11	Frecuencia Rice	0,60	0,53
12	Ind Armónico	0,00	0,02
13	Nivel Ruido	0,61	0,03
14	Frecuencia XCF	0,05	0,04
15	A Bcohe	0,03	0,00
16	f1 Tspec	0,08	0,03
17	f2 Tspec	0,03	0,06
18	Time WV	0,09	0,02
19	Frec WV	0,10	0,14
20	caudal	0,87	
21	cabeza de bomba	0,17	
22	eficiencia	0,46	

Es posible observar en la Tabla 12 que el único parámetro que cumple con una tendencia aproximadamente lineal es el caudal, sin embargo, el comportamiento de la eficiencia y de la cabeza de la bomba, manifiesta una tendencia aproximadamente lineal a partir del instante de vida 18 marcado con una banderilla roja en la Figura 22, punto en el que el fenómeno de la cavitación se encuentra en una etapa inicial.

Figura 22. Comportamiento de cabeza (H_B) y eficiencia.



El comportamiento de cabeza de bomba (H_B) y de la eficiencia a partir del instante de vida 18, sugieren ser incluidos en el análisis del modelo regresivo.

Los valores de R^2 para los datos de caudal, cabeza y eficiencia en el tiempo de vida [18 28], son aproximadamente 0.9856, 0.9727 y 0.9872, respectivamente; los mas cercanos a 1 en el análisis desarrollado y mucho mayores a los resultados obtenidos para todo el tiempo de vida [1 28] (Tabla 12).

Se soluciona el modelo regresivo para los parámetros de diagnóstico $Y(\theta, t)$: caudal, cabeza de bomba y eficiencia para el intervalo establecido, con respecto al parámetro de estado $X(\theta, t)$: obstrucción en la línea de succión, según la forma (capítulo 2):

$$Y(\theta, t) = A(t)X(\theta, t) + R(\theta, t)$$

donde:

θ : Tiempo lento de vida.

t : Tiempo rápido o dinámico.

$A(t)$: Matriz de de relación.

$R(\theta, t)$: Fenómenos aleatorios que se presentan durante el ciclo de vida de la máquina.

$X(\theta, t)$: Vector con los parámetros de estado.

$Y(\theta, t)$: Parámetros de diagnóstico.

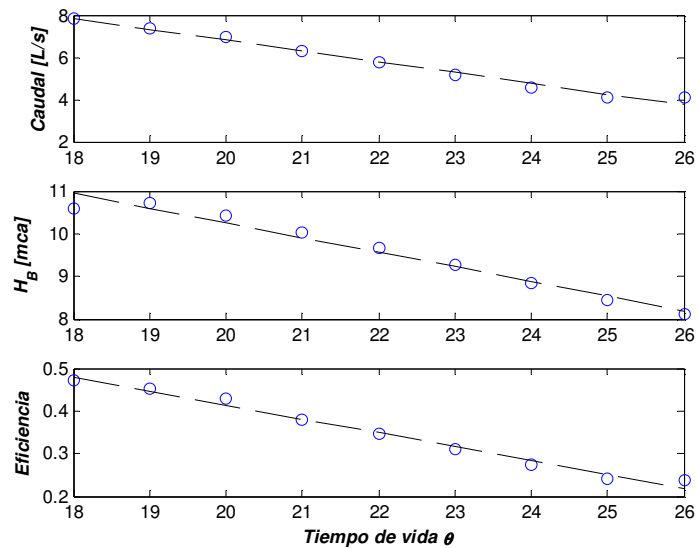
El modelo se soluciona y se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 13. Resultados de la regresión

Parámetro de Diagnóstico	Coef.	Valor probabilístico	R ²
Caudal	-0,51	<< 0.001	0,986
Cabeza de Bomba	-0,34	<< 0.001	0,973
Eficiencia	-0,03	<< 0.001	0,987

Los resultados de la Tabla 13 y de la Figura 23 prueban la estrecha relación que existe entre la obstrucción en la succión de la bomba (cavitación) y el caudal, la cabeza de la bomba (H_B) y la eficiencia; se puede concluir que el fenómeno de la cavitación ajusta muy bien por los parámetros de diagnóstico mencionados de acuerdo con los valores de R^2 . Los valores estadísticos para los coeficientes de los parámetros de diagnóstico son menores que 0.001, lo que indica que los coeficientes son significativos y que no hay pruebas para sospechar que sean iguales a cero, es decir, que aportan información a la explicación de la obstrucción en la succión de la bomba y que por lo tanto deben permanecer en el modelo.

Figura 23. Resultados de la regresión



Debido a que la simulación de la obstrucción en la succión de la bomba se realizó gradualmente, y que además se consideró solamente el intervalo de los datos en que el sistema se hallaba cavitando, se puede decir que después de que aparece el fenómeno de cavitación en el sistema de bombeo experimental:

- el incremento de una unidad en el porcentaje de obstrucción en la línea de succión de la bomba centrífuga, produce una disminución en el caudal de 0.51L/s aproximadamente,
- el incremento de una unidad en el porcentaje de obstrucción en la línea de succión de la bomba centrífuga, produce una caída de presión en la cabeza de bomba cercana a 0.34mca,
- el incremento de una unidad en el porcentaje de obstrucción en la línea de succión de la bomba centrífuga, produce una disminución en la eficiencia de la moto-bomba del 3%.

8 MÓDULO DE PRONÓSTICO

A diferencia de la tarea clásica de diagnóstico: “señal instantánea → estado (instantáneo) de la bomba centrífuga”, se emplea: “historial de la señal → señal pronosticada → pronóstico del estado de la bomba”. Los estados futuros de la bomba se pueden pronosticar con base en:

- El diagnóstico emitido en el instante t_b .
- Conocimiento de algunos estados en los instantes t_i .
- Conocimiento de las condiciones de operación de la bomba en el intervalo $[t_b, t_p]$.

8.1 CONCEPTOS PARA DETERMINAR EL PRONÓSTICO DEL ESTADO TÉCNICO DE BOMBAS CENTRÍFUGAS

El conjunto de estados $W(t_n)$ en el instante de tiempo t_n se puede caracterizar con la ayuda de un conjunto de valores de parámetros de diagnóstico $\{y_j(t); j=1,2,\dots,m\}$.

La bomba se encuentra en buen estado W^0 en un instante t_n si:

$$W(t_n) = W^0 \Leftrightarrow \forall (j=1,\dots,m) [\{y_{j,d}\} \leq \{y_j(t_n)\} \leq \{y_{j,g}\}] \quad (59)$$

donde: $\{y_{j,g}\}$, $\{y_{j,d}\}$ son los valores límite, alto y bajo, de los parámetros de diagnóstico. Igualmente, se puede formular la condición de buen estado en el instante $t_{n+\tau}$:

$$W(t_{n+\tau}) = W^0 \Leftrightarrow \forall (j=1, \dots, m) [\{y_{j,d}\} \leq \{y_j(t_{n+\tau})\} \leq \{y_{j,g}\}] \quad (60)$$

Los elementos del conjunto $\{y_j(t_{n+\tau})\}$ son desconocidos, por lo que se requiere pronosticarlos en un intervalo de tiempo τ . La variable τ se conoce como “horizonte temporal del pronóstico”.

De acuerdo a la literatura consultada, se asumen las siguientes hipótesis:

- La principal causa para que una bomba centrífuga cambie de estado son los fallos causados por el envejecimiento y desgaste de sus componentes.
- La diversidad de procesos de desgaste en un sistema de bombeo, sugiere que la información de los pronósticos deben dirigirse a subsistemas.
- El pronóstico del estado técnico de bombas centrífugas considera un periodo normal de desgaste.
- El cambio de los parámetros de diagnóstico durante el tiempo de explotación T_E es un proceso estocástico, no estacionario, que puede ser representado como una serie de tiempo.
- La serie temporal discreta se construye a partir de observaciones sucesivas realizadas a un “paso temporal” constante, Δt . La base del Δt es el tiempo de operación de la bomba.
- Los parámetros de diagnóstico Y permiten definir el estado técnico del sistema de bombeo.
- Se puede definir un valor límite para los parámetros de diagnóstico, que al ser sobrepasado se debe tratar como un fallo.

- Las acciones de mantenimiento, las pausas o cambio en las condiciones de explotación producen cambios repentinos en el estado técnico de la bomba centrífuga, y por lo tanto en los valores de los parámetros de diagnóstico.
- Considerando los factores que activan el desgaste de los componentes del sistema de bombeo son diferentes para cada caso, el pronóstico del estado técnico (PET) solo puede ser utilizado para el sistema de bombeo que le fue establecido.

El PET permite evaluar el tiempo admisible para operar el sistema de bombeo. El problema es la extrapolación para el horizonte temporal del pronóstico τ a partir de los valores de los parámetros de diagnóstico $\{y_j(t); j=1,2,\dots,m\}$.

Para solucionar el problema de determinar el PET, de acuerdo con las hipótesis asumidas, se presenta el esquema:

- El fenómeno de deterioro de estado del sistema de bombeo se representa por una serie de tiempo, $y_t = \langle y_1, y_2, \dots, y_b \rangle$, que es el conjunto de las observaciones discretas $\{y_t = \zeta(t); t = t_1, t_2, \dots, t_b\}$ de un proceso estocástico no estacionario.
- La tendencia del valor estocástico en el tiempo $t \in (t_1, t_b)$ se construye a partir de:

$$y_t = \mu(t) + \eta(t) \quad (61)$$

donde $\mu(t)$ describe la tendencia de evolución del parámetro de diagnóstico $y(t)$; y $\eta(t)$, que representa la desviación de la tendencia, expresa la influencia de factores causales (como condición del fluido, condiciones atmosféricas, calidad del mantenimiento).

- El $\mu(t)$ estimado designa los valores de los parámetros de diagnóstico observados en el instante del pronóstico t_p , así como el estado técnico de la bomba $W(t_b + \tau)$.
- Se asume un tiempo admisible T_D de acuerdo al límite del rango de error:

$$\sigma(y_t, y_p, P(y_t, \tau)) \quad (62)$$

- El tiempo de utilización T_D es el tiempo durante el cual se espera que el rango de error del pronóstico no sobrepase el valor límite del parámetro. El rango de error del pronóstico se determina por el radio r_σ :

$$r_\sigma = q\sigma_p \quad (63)$$

donde q es una constante establecida por la distribución t Student para un nivel de confianza γ y $K-2$ grados de libertad.

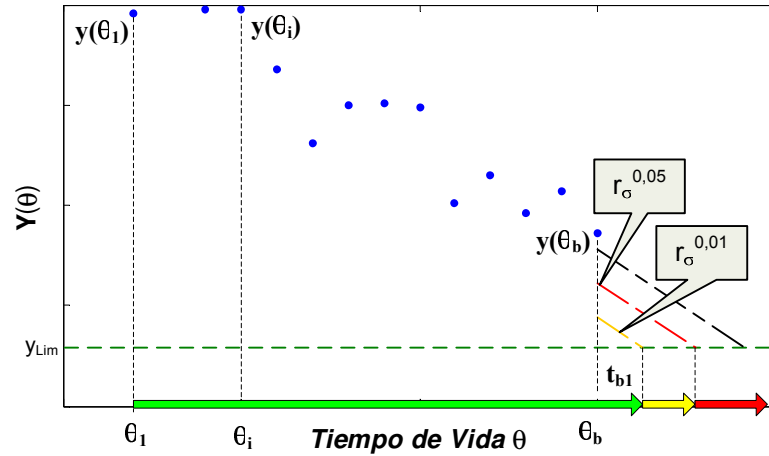
- El PET debe contener el término del siguiente servicio t_{b1} , el error del pronóstico e_p y el radio del rango de error del pronóstico r_σ :

$$PET = \langle t_{b1}, e_p, r_\sigma \rangle \quad (64)$$

- Se propone tomar como t_{b1} el valor designado como el punto de intersección de la línea de valor límite del parámetro de diagnóstico $y_{j,g}$ con la línea inferior del rango del error del pronóstico, si el parámetro es descendente, o con la superior, si el parámetro es ascendente.

- Se propone tomar dos niveles de confianza ($\gamma=1\%$ y $\gamma=5\%$), que definen tres regiones Figura 24 en la que puede estar el parámetro de diagnóstico y definidas por los respectivos radios de error $r_{\sigma}^{0,01}$: y $r_{\sigma}^{0,05}$:

Figura 24. Niveles de alerta y alarma.



- Normal (verde): no se sobrepasa el umbral establecido por el radio de confianza $r_{\sigma}^{0,01}$.
- Alerta (amarillo): se sobrepasa el umbral establecido por el radio de confianza $r_{\sigma}^{0,01}$, pero no el umbral de $r_{\sigma}^{0,05}$.
- Alarma (rojo): se sobrepasa el umbral establecido por el radio de confianza $r_{\sigma}^{0,05}$. Se interpreta como el término del siguiente servicio t_{b1} de la bomba centrífuga.

El error del pronóstico e_p y el radio r_{σ} se estiman para el intervalo (t_1, t_b) . La forma de estimar estos valores queda definida por el método de pronóstico utilizado.

Si el PET es un conjunto multi-elemento, se propone calcular sus componentes según las fórmulas:

$$t_{b1} = \frac{\sum_{j=1}^J w_j t_{b1}(y_j)}{\sum_{j=1}^J w_j}, \quad e_p = \frac{\sum_{j=1}^J w_j e_p(y_j)}{\sum_{j=1}^J w_j}, \quad r_\sigma = \frac{\sum_{j=1}^J w_j r_\sigma(y_j)}{\sum_{j=1}^J w_j} \quad (65)$$

donde:

$t_{b1}(y_j)$ es el término del siguiente diagnóstico determinado para el parámetro de diagnóstico $y_j(t_i)$, $i=1, \dots, b$,

$e_p(y_j)$ es el error de pronóstico determinado para el parámetro de diagnóstico $y_j(t_i)$, $i=1, \dots, b$,

$r_\sigma(y_j)$ es el radio r_σ determinado para el parámetro de diagnóstico $y_j(t_i)$, $i=1, \dots, b$,

w_j es el peso del parámetro de diagnóstico y_j .

Es preciso que en etapa selección y registro de datos durante el diagnóstico de la bomba centrífuga, se obtenga el conjunto de datos óptimo en forma de los parámetros de diagnóstico en los instantes t_i , $t_i \in (t1, tb)$.

8.1.1 Métodos para definir el conjunto de parámetros de diagnóstico para el pronóstico. A continuación se presenta las condiciones que definen el conjunto de parámetros de diagnóstico óptimo en el proceso de pronóstico:

- capacidad de representar los cambios de estado técnico de los componentes del sistema de bombeo en el tiempo de explotación.

- La cantidad de información sobre el estado técnico de los componentes del sistema de bombeo.
- Adecuada variación del de los parámetros de diagnóstico en el tiempo de explotación del sistema de bombeo.

Para cumplir los requerimientos listados se citan los métodos y algoritmos pertinentes que conforman el conjunto:

$$X_1 = \{ x_{1,1}, x_{1,2}, x_{1,3}, x_{1,4} \}$$

8.1.1.1 Método de sensibilidad del parámetro al cambio de estado, $x_{1,1}$. Este método permite extraer el parámetro de diagnóstico que posee el máximo valor del indicador a_j ,

$$a_j = \sum_{i=1}^k M(i, j) ; i=1,2,..., k; j=1,..., m \quad (66)$$

donde:

$M(i,j) \in [M(i,j)]_{k \times m}$ es un elemento binario de la matriz de diagnóstico del sistema de bombeo.

La selección del parámetro y^* del conjunto de parámetros de diagnóstico se debe realizar seleccionando el y_j de máximos valores a_j :

$$y^* = y_{j^*} \\ j^* \in 1,..., m \wedge a_{j^*} = \max_{j=1,...,m} (a_j) \quad (67)$$

8.1.1.2 Método del cambio relativo del parámetro con el estado técnico, $x_{1,2}$. Este método permite elegir el parámetro de diagnóstico que posee el máximo valor del indicador k_j . Considera la velocidad media de cambio de los parámetros de diagnóstico en el intervalo de tiempo $[t_1, t_b]$. Se define como:

$$k_j = \frac{b_j}{\sum_{j=1}^m b_j} \quad (68)$$

$$b_j = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K \frac{|y_j(t_{i+1}) - y_j(t_i)|}{(t_{i+1} - t_i) |y_j(t_1) - y_{j,g}|}$$

donde K es el número de elementos de la serie de tiempo en el rango $[t_1, t_b]$.

La selección del parámetro de diagnóstico y^* se ejecuta según:

$$y^* = y_{j^*} \quad j^* \in 1, \dots, m \wedge k_{j^*} = \max_{j=1, \dots, m} (k_j) \quad (69)$$

8.1.1.3 Método de la capacidad de información del parámetro de diagnóstico, $x_{1,3}$. Este permite seleccionar el parámetro de diagnóstico con la mayor cantidad de información sobre el estado técnico del sistema de bombeo.

Un parámetro de diagnóstico es más significativo al cambio del estado técnico del sistema de bombeo cuando está fuertemente correlacionado con éste y débilmente correlacionado con otros parámetros de diagnóstico. Esta relación se presenta en forma del indicador de la capacidad del parámetro de diagnóstico h_j :

$$h_j = \left| \frac{r_j^2}{1 + \sum_{i,j=1}^m |r_{i,j}|} \right| \quad (70)$$

donde:

$r_j = r(W, y_j); j=1, \dots, m$ es el coeficiente de correlación lineal entre el estado W del sistema de bombeo y el parámetro de diagnóstico y_j .

$r_{i,j} = r(y_i, y_j); i, j = 1, \dots, m; i \neq j$ es el coeficiente de correlación lineal entre los parámetros y_i y y_j .

Si no existen datos del conjunto W , se propone construir el PET en el rango de desgaste normal y tiempo de operación de la bomba:

$r_j = r(t_i, y_j); j=1, \dots, m; i=1, \dots, K$ es el coeficiente de correlación lineal entre variables $t_i \in (t_1, t_b)$ (t_i es el tiempo de operación de la bomba centrífuga) y y_j .

La selección del parámetro y^* del conjunto de parámetros de diagnóstico se ejecuta maximizando el indicador h_j según:

$$j^* \in 1, \dots, m \wedge h_{j^*} = \max_{j=1, \dots, m} (h_j) \quad (71)$$

8.1.1.4 Método de la variación del parámetro, $x_{1,4}$. Este método permite seleccionar el parámetro de diagnóstico que indica mejor la variación en el tiempo de explotación del sistema de bombeo. Se selecciona el parámetro que posee el valor máximo del indicador de variación g_j :

$$g_j = \frac{s_j}{\sum_{j=1}^m s_j} \quad (72)$$

$$s_j = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K \frac{|y_j(t_{i+1}) - y_j(t_i)|}{t_{i+1} - t_i}$$

donde K es el número de elementos de la serie de tiempo en el rango (t_1, t_b) .

La selección del parámetro de diagnóstico y^* se realiza con base en la relación:

$$y^* = y_{j^*} \quad (73)$$

$$j^* \in 1, \dots, m \wedge g_{j^*} = \max_{j=1, \dots, m} (g_j)$$

8.1.2 Tarea de optimización para determinar el conjunto de parámetros de diagnóstico. La tarea para determinar el conjunto de parámetros de diagnóstico va a ser:

$$(X_1, F_1, \Phi_1) \quad (74)$$

donde:

X_1 es el conjunto de soluciones admisibles $X_1 = \{x_{1,1}, x_{1,2}, x_{1,3}, x_{1,4}\}$.

F_1 son los criterios para la selección de los parámetros de diagnóstico, o indicador de calidad de la solución $F_1(X_1) = (f_{1,1}(x), f_{1,2}(x))$.

Φ_1 es la relación de dominio.

Con el propósito de determinar el conjunto de soluciones dominantes $X_D^{\Phi_1}$, en la tarea de optimización se debe encontrar el producto de los conjuntos X_1^1 y X_1^2 :

$$X_1^1 = \{x^* \in X_1 : f_{1,1}(x^*) = \max_{x \in X_1} f_{1,1}(x)\} \quad (75)$$

$$X_1^2 = \{x^* \in X_1 : f_{1,2}(x^*) = \max_{x \in X_1} f_{1,2}(x)\} \quad (76)$$

donde:

$$f_{1,1}(x) = \frac{s_j}{\bar{y}_j}; \quad \bar{y}_j, s_j \text{ son la media y la desviación estándar del parámetro } y_j.$$

$$f_{1,2}(x) = r(y_j, W); \text{ la correlación del parámetro de diagnóstico y el estado técnico.}$$

Se deben solucionar dos tareas:

- maximizar la función:

$$f_{1,1}(x) = e_j(x), \quad x \in X_1; j = 1, \dots, n \quad (77)$$

- maximizar la función:

$$f_{1,2}(x) = r_j(x), \quad x \in X_1; j = 1, \dots, n \quad (78)$$

Posteriormente se determinan los conjuntos X_1^1 y X_1^2 :

$$X_1^1 = \{x^* \in X_1 : e_j(x^*) = \max_{x \in X_1} e_j(x)\} \quad (79)$$

$$X_1^2 = \{x^* \in X_1 : r_j(x^*) = \max_{x \in X_1} r_j(x)\} \quad (80)$$

y el conjunto de soluciones dominantes como el producto de los conjuntos X_1^1 y X_1^2

$$X_D^{\Phi 1} = X_1^1 \cap X_1^2$$

Si el conjunto $X_D^{\Phi 1}$ es vacío, se determina un conjunto de soluciones no dominantes $X_N^{\Phi 1}$ y un conjunto de soluciones de compromiso $X_K^{\Phi 1}$.

Se determina la coordenada del punto ideal $c^* = (c_1^*, c_2^*)$:

$$c_1^* = \max_{x \in X_1} e_j(x); \quad c_2^* = \max_{x \in X_1} r_j(x) \quad (81)$$

El indicador de calidad de la solución se normaliza según:

$$F_1^*(x) = \{f_{1,1}^*(x), f_{1,2}^*(x)\} \quad (82)$$

donde:

$$f_{1,1}^*(x) = \frac{f_{1,1}(x)}{c_1^{\max}}, \quad f_{1,2}^*(x) = \frac{f_{1,2}(x)}{c_2^{\max}} \quad (83)$$

por esto:

$$c_1^{\max} = \max_{x \in X_1} f_{1,1}(x), \quad c_2^{\max} = \max_{x \in X_1} f_{1,2}(x) \quad (84)$$

La normalización presentada mantiene las proporciones de los indicadores y garantiza que sus valores se encuentren entre 0 y 1. El punto ideal normalizado tiene la forma:

$$c^{**} = (c_1^{**}, c_2^{**}) \quad (85)$$

considerando la forma del conjunto de soluciones admisibles X_1 para determinar los resultados no dominantes $C_N^{\Phi 1}$ y de este, el conjunto de soluciones no dominantes $X_N^{\Phi 1}$ y de compromiso $X_K^{\Phi 1}$:

Sea c^{**} el punto ideal normalizado y C^* el conjunto conocido de los resultados normalizados:

$$C^* = \{c^{*i}\}, \quad i = 1, \dots, n \quad (86)$$

donde $c^{*i} = (c_1^{*i}, c_2^{*i})$, por esto:

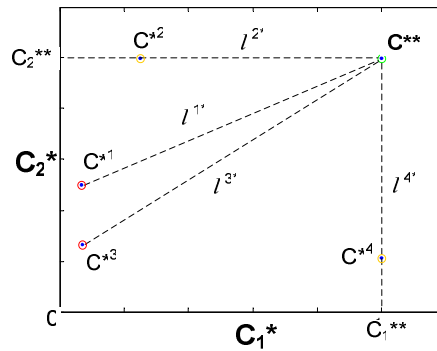
$$c_1^{*i} = \frac{c_1^i}{c_1^{\max}}, \quad c_2^{*i} = \frac{c_2^i}{c_2^{\max}} \quad (87)$$

Para definir los resultados de compromiso se propone calcular la norma de euclidiana:

$$l_i = \|c^{**} - c^{*i}\|_2 = \sqrt{(c_1^{**} - c_1^{*i})^2 + (c_2^{**} - c_2^{*i})^2} \quad (88)$$

y se selecciona el resultado c^0 que minimiza el valor de la norma l_i . La interpretación del método se presenta en la Figura 25:

Figura 25. Interpretación de la tarea 8.1.2.



8.1.3 Métodos de pronóstico. Se presenta el conjunto de los métodos de pronósticos que muestran su eficiencia sobre otros en pronósticos de sistemas técnicos:

$$X_2 = \{ x_{2,1}, x_{2,2}, \dots, x_{2,m} \}$$

Entre los métodos implementados se incluyen métodos de extrapolación de tendencia y métodos adaptativos.

8.1.3.1 Método del parámetro general, $x_{2,1}$. Este método consiste en reemplazar la función multi-variable (parámetros de diagnóstico $y_j(t)$) que describe el proceso de deterioro del estado técnico de la bomba centrífuga, por una función uni-variable $Y(t)$ según la expresión:

$$Y(t) = \frac{\sum_{j=1}^M w_j |y_j(t)|^\lambda}{\sum_{j=1}^M w_j} \quad (89)$$

donde $|y_j(t)|$ es el valor relativo del módulo del parámetro de diagnóstico:

$$|y_j(t)| = \left| \frac{y_j(t) - y_{j,g}}{y_{j,n} - y_{j,g}} \right| \quad (90)$$

donde:

$y_j(t)$ es el valor del parámetro $y_j \in Y$ en el instante $t \in (t_1, t_b)$,

$y_{j,g}$ es el valor límite del parámetro y_j ,

$y_{j,n}$ es el valor nominal del parámetro y_j o su valor en el instante t_1 ,

w_j es el valor de la función de peso del parámetro y_j ,

λ es el exponente de la función. Define la forma.

Se propone le siguiente algoritmo:

- Definir los valores del parámetro general $Y(t)$, $t \in (t_1, t_b)$, a partir de la observación de los parámetros de diagnóstico en el tiempo (t_1, t_b) .
- Aproximar la característica $Y(t)$ a la recta $Z(t)$ y definir el valor del parámetro de diagnóstico pronosticado $Y_p(t_{b+\tau}) = Z(t_{b+\tau})$.
- Calcular el radio del error r_σ :

$$r_{\sigma} = \frac{q \sqrt{\frac{1}{K-2} \sum_{i=1}^K e_{p,i}^2}}{\sqrt{K}} \quad (91)$$

- Calcular el término del siguiente diagnóstico t_{b1} como el punto de intersección del eje de las abscisas con el limite inferior del rango del error de pronostico definido por el radio r_{σ} :

$$t_{b1} = t_b + \frac{\tau(Z(t_b) - r_{\sigma})}{Z(t_b) - Z(t_b + \tau)} \quad (92)$$

- Definir el error $e_p(t_{b1})$:

$$e_p = \frac{1}{K+I} \sum_{i=1}^{K+I} e_p(t_i) \quad (93)$$

como el promedio de las diferencias $e_p(t_i) = |Y(t_i) - Z(t_i)|$ en el tiempo (t_1, t_b) y en los pasos siguientes t_{bi} .

8.1.3.2 Método de la función de regresión $x_{2,2}$. Este método parte de la hipótesis que la distribución del error de los parámetros $y_j(t)$ es normal con respecto a la recta de regresión lineal. El pronóstico y_p se obtiene por el método de los mínimos cuadrados.

$$y_p = at + b \quad (94)$$

donde a y b son estimadores de los parámetros α y β de la función de regresión lineal $y = \alpha t + \beta$.

Como verificación del modelo se calcula el coeficiente de correlación R^2 , y se acepta el modelo para $R^2 > 0.8$; de lo contrario no se emplea el método $x_{2,2}$.

Se propone el siguiente algoritmo:

- Calcular con el método la función de regresión lineal para los parámetros de diagnóstico y_j en el intervalo (t_1, t_b) , mediante el método de los mínimos cuadrados.
- Definir el valor pronosticado del parámetro de diagnóstico $y_{j,p}(t_b+\tau)$.
- Calcular el radio del error r_σ :

$$r_\sigma = q \sqrt{\frac{1}{K-2} \sum_{i=1}^K e_{pi}^2} \sqrt{1 + \frac{1}{K} + \frac{(t_i - \bar{t})^2}{\sum_{i=1}^K (t_i - \bar{t})^2}} \quad (95)$$

- calcular el término del siguiente diagnóstico t_{b1} como el punto de intersección de la línea del valor limite del parámetro de diagnóstico $y_{j,g}$ con el límite inferior (si $y_j(t_b) > y_{j,g}$) o superior (si $y_j(t_b) < y_{j,g}$) del intervalo de error de pronóstico definido por el radio r_σ :

para $y_j(t_b) > y_{j,g}$:

$$t_{b1} = t_b + \frac{\tau(y_{j,p}(t_b) - r_\sigma - y_{j,g})}{y_{j,p}(t_b) - y_{j,p}(t_b + \tau)}$$

para $y_j(t_b) < y_{j,g}$:

$$t_{b1} = t_b + \frac{\tau(y_{j,g} - y_{j,p}(t_b) - r_\sigma)}{y_{j,p}(t_b + \tau) - y_{j,p}(t_b)}$$

(96)

Las ecuaciones anteriores se trabajan bajo la hipótesis de que en el intervalo (t_b, t_{b1}) el parámetro y_j va atener una aproximación lineal.

- Definir el error $e_p(t_{b1})$:

$$e_p = \frac{1}{K+I} \sum_{i=1}^{K+I} e_p(t_i) \quad (97)$$

como el promedio de las diferencias $ep(t_i)=|Y(t_i)-Z(t_i)|$ en el tiempo (t_1, t_b) y en los pasos siguientes t_{bi} .

8.1.3.3 Método de Brown-Mayer de orden 1, $x_{2,3}$. El método supone que la variable que describe el proceso de deterioro del estado técnico del sistema de bombeo no muestra oscilaciones periódicas; presenta tendencia y oscilaciones casuales que pueden tener cambios en el tiempo.

El modelo temporal de la variable $Y(t)$ es de la forma:

$$Y(t) = \mu(t) + \xi(t) \quad (98)$$

donde:

$\mu(t)$ es la función de tendencia.

$\xi(t)$ es el componente aleatorio.

El pronóstico y_p del parámetro se calcula bajo la hipótesis de tendencia linealidad de la variable:

$$y_p = a_t^{(0)} + \tau a_t^{(1)} \quad (99)$$

donde:

$$a_t^{(0)} = M_t = 2M_t^{(1)} - M_t^{(2)},$$

$$a_t^{(1)} = T_t = \frac{\alpha}{(1-\alpha)} (M_t^{(1)} - M_t^{(2)}),$$

y:

$$M_t^{(1)} = \alpha y_t + (1 - \alpha) M_{t-1}^{(1)},$$

$$M_t^{(2)} = \alpha M_t^{(1)} + (1 - \alpha) M_{t-1}^{(2)},$$

α : parámetro de suavizamiento exponencial, $\alpha \in (0,1)$.

El autor propone optimizar el parámetro α con el criterio de mínima divergencia. (Gaynor,59,2004)

Con el propósito de obtener PET se propone el siguiente algoritmo.

- Definir el valor pronosticado del parámetro de diagnóstico $y_{j,p}(t_{b+\tau})$ de acuerdo a (99).
- Calcular el radio del error r_σ :

$$r_\sigma = q \sqrt{\frac{1}{K-2} \sum_{i=1}^K e_{pi}^2} \sqrt{\frac{\alpha}{(1-\alpha)^3} [1 + 4(1-\alpha) + 5(1-\alpha)^2 + 2(4-3\alpha)t^2 + 2\alpha^2 t^2]} \quad (100)$$

- calcular el término del siguiente diagnóstico t_{b1} como el punto de intersección de la línea del valor limite del parámetro de diagnóstico $y_{j,g}$ con el límite inferior (si $y_j(t_b) > y_{j,g}$) o superior (si $y_j(t_b) < y_{j,g}$) del intervalo de error de pronóstico definido por el radio r_σ :

para $y_j(t_b) > y_{j,g}$:

$$t_{b1} = t_b + \frac{\tau(y_{j,p}(t_b) - r_\sigma - y_{j,g})}{y_{j,p}(t_b) - y_{j,p}(t_b + \tau)}$$

para $y_j(t_b) < y_{j,g}$:

$$t_{b1} = t_b + \frac{\tau(y_{j,g} - y_{j,p}(t_b) - r_\sigma)}{y_{j,p}(t_b + \tau) - y_{j,p}(t_b)}$$

(101)

Las ecuaciones anteriores se trabajan bajo la hipótesis de que en el intervalo (t_b, t_{b1}) el parámetro y_j va atener una aproximación lineal.

- Definir el error $e_p(t_{bi})$:

$$e_p = \frac{1}{K+I} \sum_{i=1}^{K+I} e_p(t_i) \quad (102)$$

como el promedio de las diferencias $ep(t_i)=|Y(t_i)-Z(t_i)|$ en el tiempo (t_1, t_b) y en los pasos siguientes t_{bi} .

8.1.3.4 Método de Brown-Mayer de orden 2, $x_{2,3}$. Este método, al igual que el anterior, supone que la variable que describe el proceso de deterioro del estado técnico de la bomba, no muestra oscilaciones periódicas, presenta tendencia y oscilaciones casuales que pueden tener cambios en el tiempo.

El valor pronosticado del parámetro y_p se calcula de la relación:

$$y_p = a_t^{(0)} + \tau a_t^{(1)} + \tau^2 a_t^{(2)} \quad (103)$$

donde:

$$\begin{aligned} a_t^{(0)} &= M_t = 3(M_t^{(1)} - M_t^{(2)}) + M_t^{(3)}, \\ a_t^{(1)} &= T_t = \frac{\alpha}{2(1-\alpha)^2} \{ (6-5\alpha) M_t^{(1)} - 2(5-4\alpha)M_t^{(2)} + (4-3\alpha) M_t^{(3)} \}, \\ a_t^{(2)} &= Q_t = \frac{\alpha^2}{2(1-\alpha)^2} \{ M_t^{(1)} - 2M_t^{(2)} + M_t^{(3)} \}, \end{aligned}$$

y:

$$\begin{aligned} M_t^{(1)} &= \alpha y_t + (1-\alpha) M_{t-1}^{(1)}, \\ M_t^{(2)} &= \alpha M_t^{(1)} + (1-\alpha) M_{t-1}^{(2)}, \\ M_t^{(3)} &= \alpha M_t^{(2)} + (1-\alpha) M_{t-1}^{(3)}, \\ \alpha &: \text{parámetro suavizamiento exponencial, } \alpha \in (0,1). \end{aligned}$$

El autor propone optimizar el parámetro α con el criterio de mínima divergencia. (Gaynor, 59, 2004)

Con el propósito de obtener PET se propone el siguiente algoritmo:

- Definir el valor pronosticado del parámetro de diagnóstico $y_{j,p}(t_{b+\tau})$ de acuerdo a (99).
- Calcular el radio del error r_σ :

$$r_\sigma = q \sqrt{\frac{1}{K-2} \sum_{i=1}^K e_{pi}^2} \sqrt{2\alpha + 3\alpha^2 + 3\alpha^3 \tau^2} \quad (104)$$

- calcular el término del siguiente diagnóstico t_{b1} como el punto de intersección de la línea del valor limite del parámetro de diagnóstico $y_{j,g}$ con el límite inferior (si $y_j(t_b) > y_{j,g}$) o superior (si $y_j(t_b) < y_{j,g}$) del intervalo de error de pronóstico definido por el radio r_σ :

para $y_j(t_b) > y_{j,g}$:

$$t_{b1} = t_b + \frac{\tau(y_{j,p}(t_b) - r_\sigma - y_{j,g})}{y_{j,p}(t_b) - y_{j,p}(t_b + \tau)}$$

para $y_j(t_b) < y_{j,g}$:

$$t_{b1} = t_b + \frac{\tau(y_{j,g} - y_{j,p}(t_b) - r_\sigma)}{y_{j,p}(t_b + \tau) - y_{j,p}(t_b)}$$

(105)

Las ecuaciones anteriores se trabajan bajo la hipótesis de que en el intervalo (t_b, t_{b1}) el parámetro y_j va a tener una aproximación lineal.

- Definir el error $e_p(t_{b1})$:

$$e_p = \frac{1}{K+I} \sum_{i=1}^{K+I} e_p(t_i) \quad (106)$$

como el promedio de las diferencias $e_p(t_i)=|Y(t_i)-Z(t_i)|$ en el tiempo (t_1, t_b) y en los pasos siguientes t_{bi} .

8.1.4 Tarea de optimización del método de pronóstico. La tarea para seleccionar el método de pronóstico se establece como:

$$(X_2, F_2, \Phi_2) \quad (107)$$

donde:

X_2 es el conjunto de soluciones admisibles, $X_2 = \{x_{2,1}, x_{2,2}, x_{2,3}, x_{2,4}\}$.

F_2 son los criterios para la selección del método, o indicador de calidad de la solución $F_2(X_2)=(f_{2,1}(x), f_{2,2}(x))$.

Φ_2 es la relación de dominio.

Para determinar el conjunto de soluciones dominantes $X_D^{\Phi_2}$, en la tarea de optimización se debe encontrar el producto de los conjuntos X_2^1 y X_2^2 :

$$X_2^1 = \{x^* \in X_2 : f_{2,1}(x^*) = \max_{x \in X_2} f_{2,1}(x)\} \quad (108)$$

$$X_2^2 = \{x^* \in X_2 : f_{2,2}(x^*) = \max_{x \in X_2} f_{2,2}(x)\} \quad (109)$$

donde:

$f_{2,1}(x) = U^2 = \frac{1}{\sum_{i=1}^K y_i^2} \sum_{i=1}^K e_{p,i}^2$ es la medida Theil, o coeficiente de divergencia relativa del error del pronóstico.

$f_{2,2}(x) = r_\sigma = q\sigma$ es el radio de error del pronóstico; q se calcula de la distribución t Student y σ es la desviación estándar del componente aleatorio del error.

Se deben solucionar dos tareas:

- minimizar la función:

$$f_{2,1}(x) = U^2(x), \quad x \in X_2 \quad (110)$$

- minimizar la función:

$$f_{2,2}(x) = r_\sigma(x), \quad x \in X_2 \quad (111)$$

Posteriormente se determinan los conjuntos X_2^1 y X_2^2 :

$$X_2^1 = \{x^* \in X_2 : U^2(x^*) = \min_{x \in X_2} U^2(x)\} \quad (112)$$

$$X_2^2 = \{x^* \in X_2 : r_\sigma(x^*) = \min_{x \in X_2} r_\sigma(x)\} \quad (113)$$

y el conjunto de soluciones dominantes como el producto de los conjuntos X_1^1 y X_1^2

$$X_D^{\Phi^2} = X_2^1 \cap X_2^2$$

Si el conjunto $X_D^{\Phi^2}$ es vacío, se determina un conjunto de soluciones no dominantes $X_N^{\Phi^2}$ y un conjunto de soluciones de compromiso $X_K^{\Phi^2}$.

Se determina la coordenada del punto ideal $d^* = (d_1^*, d_2^*)$:

$$d_1^* = \min_{x \in X_2} U^2(x), \quad d_2^* = \min r_\sigma(x) \quad (114)$$

Los indicadores de calidad se normalizan como sigue:

$$F_2^*(x) = \{f_{2,1}^*(x), f_{2,2}^*(x)\} \quad (115)$$

donde:

$$f_{2,1}^*(x) = \frac{d_1^{\min}}{f_{2,1}(x)}, \quad f_{2,2}^*(x) = \frac{d_2^{\min}}{f_{2,2}(x)} \quad (116)$$

por esto:

$$d_1^{\min} = \min_{x \in X_2} f_{2,1}(x), \quad d_2^{\min} = \min_{x \in X_2} f_{2,2}(x) \quad (117)$$

El punto ideal normalizado queda definido por:

$$d^{**} = (d_1^{**}, d_2^{**}) \quad (118)$$

Para determinar la solución de compromiso se calcula la norma euclidiana, que corresponde a la distancia entre los resultados $d^* \in D^*$ y el punto ideal d^{**} . D es el conjunto conocido de resultados normalizados:

$$D^* = \{d^{*i}\}, \quad i = 1, \dots, n \quad (119)$$

donde:

$$d^{*i} = (d_1^{*i}, d_2^{*i}) \quad (120)$$

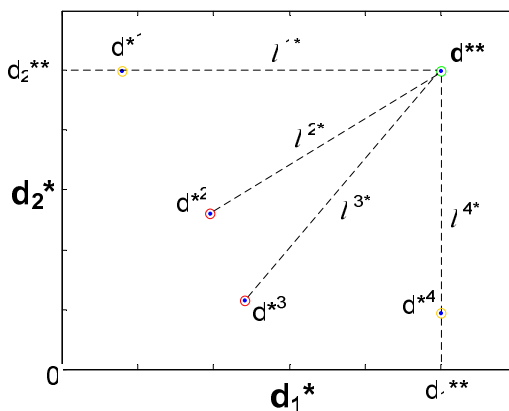
$$d_1^{*i} = \frac{d_1^{\min}}{d_1^i}, d_2^{*i} = \frac{d_2^{\min}}{d_2^i} \quad (121)$$

La norma euclidiana está dada por:

$$r_i = |d^{**} - d^{*i}|_2 = \sqrt{(d_1^{**} - d_1^{*i})^2 + (d_2^{**} - d_2^{*i})^2} \quad (122)$$

Se selecciona como resultado d^0 el cual minimiza el valor de la norma l_i .

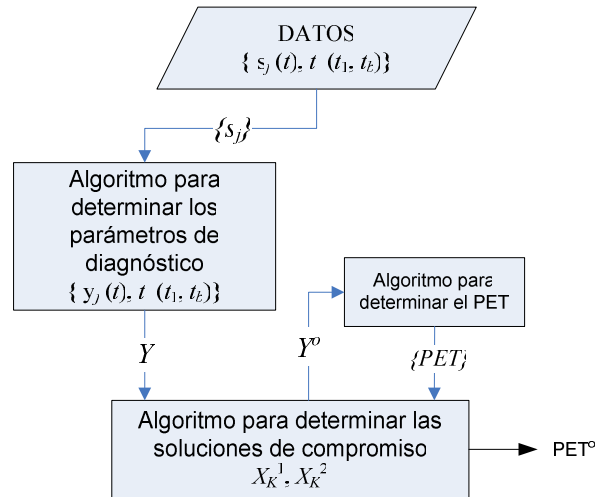
Figura 26. Interpretación de la tarea 8.1.4.



8.1.5 Algoritmo para determinar el pronóstico óptimo PET⁰.

Se propone el algoritmo para calcular el pronóstico óptimo del estado técnico, con base en los procedimientos trabajados y considerando la necesidad de ayuda computacional Figura 27:

Figura 27. Diagrama para determinar el PET°.



8.2 EXPERIMENTACIÓN

El experimento busca verificar la utilidad del método propuesto para determinar el pronóstico óptimo del estado técnico (PET°) aplicado al sistema de bombeo experimental objeto de la investigación.

8.2.1 Definición del número de parámetros optimo para el pronóstico.

Para la definición del conjunto de los parámetros de diagnóstico óptimos para el diagnóstico se sigue el procedimiento descrito en la sección 8.1.1.

Con el propósito de determinar las coordenadas del punto ideal c^{**} se solucionó la tarea de optimización 8.1.2 de acuerdo a los procedimientos descritos en la sección 8.1.1; se trabajó con función computacional:

$$[X1, X1c, ri, wj] = \text{my_OptimumParameter}(Y, M, 1) \quad (123)$$

escrita en el lenguaje computacional MatLab[®] por el autor como herramienta para los procesos computacionales y que se apoya en las sub-funciones:

[aj,x11] = my_MaxSens(M): Comprende el método $x_{1,1}$ (sección 8.1.1.1). La función se encarga de seleccionar el parámetro que presenta la máxima sensibilidad al cambio de estado técnico del sistema de bombeo experimental.

[kj,x12] = my_MaxDelta(Y,dt): Comprende el método $x_{1,2}$ (sección 8.1.1.2). La función se encarga de seleccionar el parámetro que presenta el máximo cambio relativo con respecto al cambio de estado técnico del sistema de bombeo experimental.

[hj,x13] = my_MaxQInfo(Y): Comprende el método $x_{1,3}$ (sección 8.1.1.3). La función se encarga de seleccionar el parámetro que presenta la máxima cantidad de información con respecto al estado técnico del sistema de bombeo experimental.

[gj,x14] = my_MaxVar(Y,dt): Comprende el método $x_{1,4}$ (sección 8.1.1.4). La función se encarga de seleccionar el parámetro que presenta la máxima variación con el cambio de estado técnico del sistema de bombeo experimental.

[f11,X1c,dj] = my_FnVar(Y,X1p): Comprende el criterio $f_{1,1}$ (sección 8.1.2) basado en los coeficientes de variabilidad del conjunto de parámetros seleccionado.

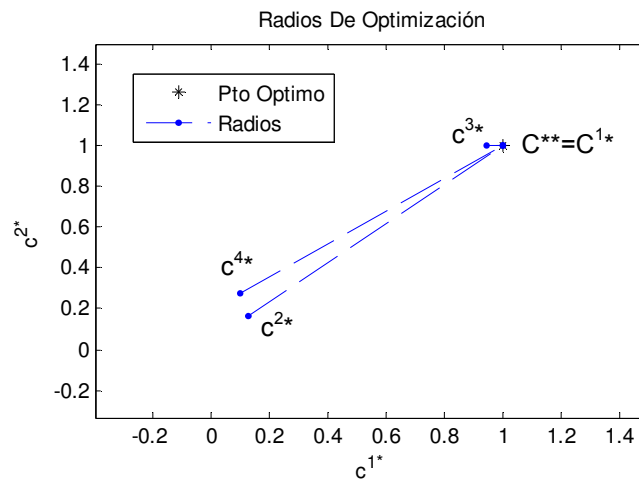
[f12] = my_FnCorr(Y,X1c): Comprende el criterio $f_{1,2}$ (sección 8.1.2) basado en correlación del conjunto de parámetros de diagnóstico seleccionados con respecto al estado técnico del sistema de bombeo experimental.

Para la solución de la tarea 8.1.2, se consideran los parámetros que resultaron en la Tabla 7 y la Tabla 9. Los resultados se presentan en la Tabla 14.

Tabla 14. Resultados de la tarea 8.1.2.

$Y \setminus X_1$	$x_{1,1}$	$x_{1,2}$	$x_{1,3}$	$x_{1,4}$	l_i
BOMBA					
RMS	y^*				1,21
Pico					
D.Standar					
Frecuencia Rice					
Ind Armonico	y^*				1,15
MOTOR					
D.Standar					
Global RMS					
Max. Amplitud					
OTROS					
Caudal	y^*				0,05
H_B					
Eficiencia	y^*				0

Figura 28. Interpretación gráfica de los resultados de la tarea 8.1.2.



Con base en los resultados de la Tabla 14 y la Figura 28 se puede concluir que existe una solución dominante a la tarea 8.1.2: eficiencia, porque su distancia al punto ideal c^{**} es 0, como se aprecia en la fila resaltada. Este resultado coincide con el obtenido en el experimento para obtener el modelo regresivo (sección

7.5.6); el parámetro de diagnóstico eficiencia, presentó el mayor R^2 con respecto al estado técnico del sistema de bombeo.

8.2.2 Definición del pronóstico óptimo del estado técnico PET^o.

Para determinar las coordenadas del punto ideal d^{**} se solucionó la tarea de optimización 8.1.4 de acuerdo a los procedimientos descritos en la sección 8.1.5; se trabajó con función computacional:

$$[X2, tb1, r_sigma, wi] = my_OptimumForecast(Yc, Xc, gc, wj, dt) \quad (124)$$

escrita en el lenguaje computacional MatLab[®] por el autor como herramienta para los procesos computacionales y que se apoya en las sub-funciones:

$[X21, tb1_21, r_sigma_21, U2_21] = my_GenPar(Y, g, wj, dt)$: Comprende el método de pronóstico $x_{2,1}$ (sección 8.1.3.1). La función se encarga de calcular los elementos del PET en base al método del parámetro general, para los parámetros óptimos determinados a partir de la tarea 8.1.2.

$[X22, tb1_22, r_sigma_22, U2_22] = my_RegressFn(Y, g, dt)$: Comprende el método de pronóstico $x_{2,2}$ (sección 8.1.3.2). La función se encarga de calcular los elementos del PET en base al método de la función de regresión para el conjunto de parámetros óptimos determinado a partir de la tarea 8.1.2.

$[F, tb1, r_sigma, U2] = my_brown1(Y, g, alpha, Xc, dt)$: Comprende el método de pronóstico $x_{2,3}$ (sección 8.1.3.3). La función se encarga de calcular los elementos del PET en base al método adaptativo de Brown-Mayer de primer orden, para los parámetros óptimos determinados a partir de la tarea 8.1.2.

[F,tb1,r_sigma,U2] = my_brown2(Y,g,alpha,Xc,dt): Comprende el método de pronóstico $x_{2,4}$ (sección 8.1.3.4). La función se encarga de calcular los elementos del PET en base al método adaptativo de Brown-Mayer de segundo orden, para los parámetros óptimos determinados a partir de la tarea 8.1.2.

Para el pronóstico se considera el parámetro de diagnóstico: eficiencia, dado que resultó ser la solución dominante de la tarea 8.1.2. Los resultados de la tarea de optimización del pronóstico 8.1.4, se presentan en la Tabla 15.

Figura 29. Representación gráfica de los resultados de los pronósticos.

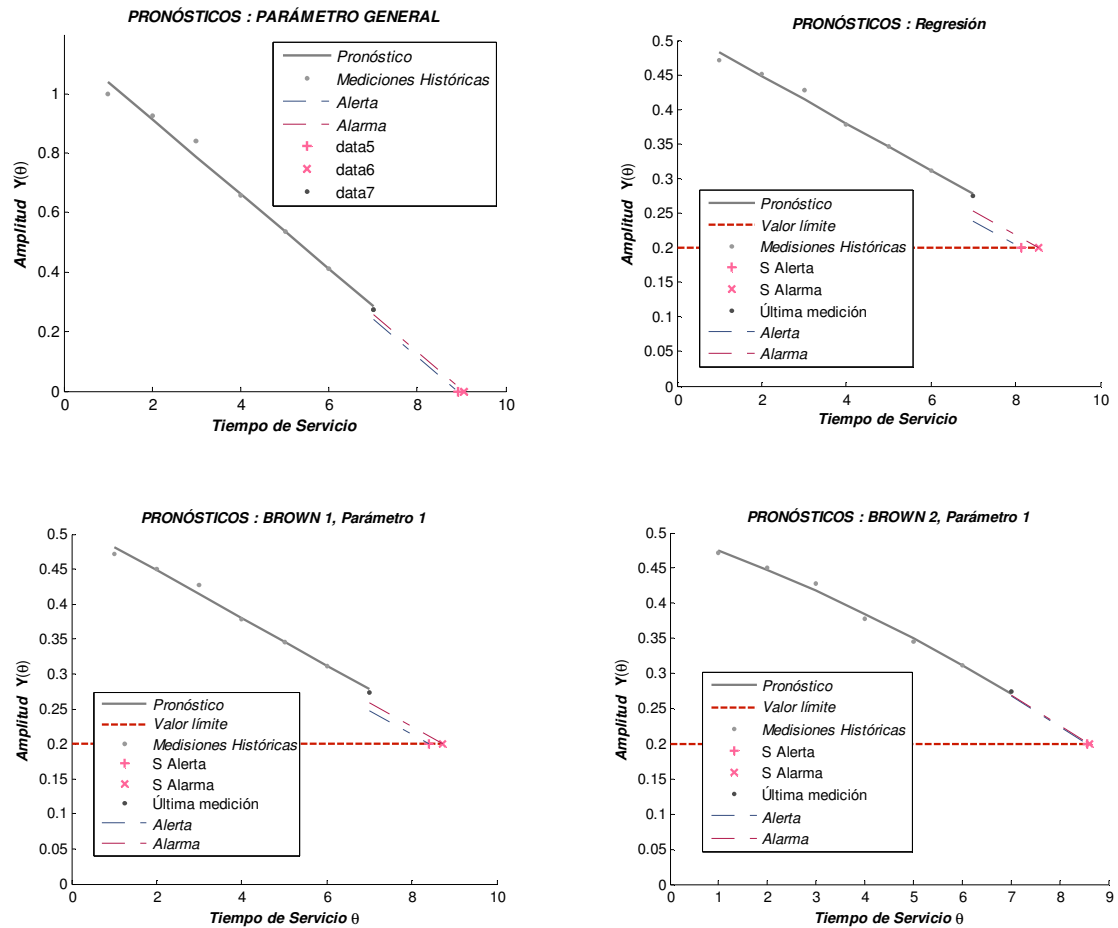
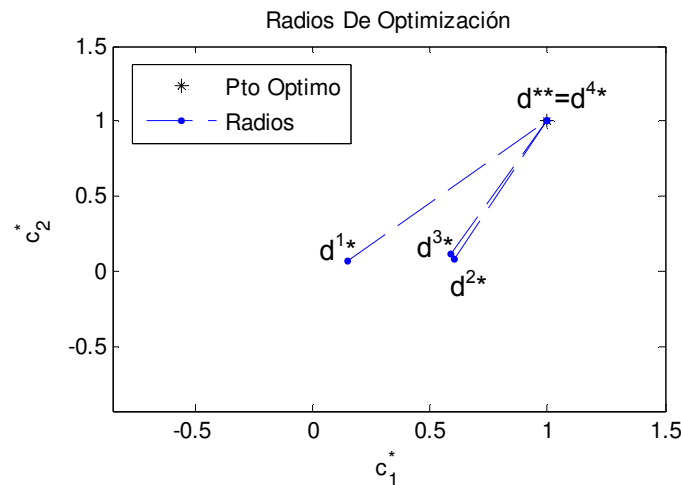


Tabla 15. Resultados de la tarea 8.1.4

X_2		e_p	$r_{\sigma 1}$	$t_{b1,1}$	$r_{\sigma 2}$	$t_{b1,2}$	l_i
$x_{2,1}$	<i>P. General</i>	0,0012	0,045	8,92	0,029	9,05	1,25
$x_{2,2}$	<i>Fn. de reg</i>	0,000317	0.039	8.12	0,025	8.54	0,99
$x_{2,3}$	<i>Brown M. 1</i>	0,000323	0,03	8,4	0,019	8,72	0,97
$x_{2,4}$	<i>Brown M. 2</i>	0,00019	0.0036	8.58	0,0023	8.61	0

Figura 30. Interpretación gráfica de los resultados de la tarea 8.1.4



A partir de los resultados de la Tabla 15 y la Figura 30 es posible concluir que existe una solución dominante a la tarea 8.1.4: método adaptativo de Brown-Mayer de segundo orden, porque su distancia al punto ideal d^{**} es 0, como se aprecia en la fila resaltada y en la figura, al coincidir con el punto ideal.

En la grafica correspondiente al pronóstico por medio del método adaptativo de Brown-Mayer de segundo orden en la Figura 29, es evidente la estrechez de las franjas de confianza, lo que permite tener umbrales de alarma y de alerta mas ajustados. Un radio de confianza relativamente estrecho permite aprovechar más la vida útil del sistema de bombeo.

9 CONCLUSIONES

Como resultado de la investigación desarrollada en el campo del diagnóstico técnico y a los estudios realizados a un sistema de bombeo experimental se puede decir que un diagnóstico completo que se realice al sistema de bombeo experimental debe definir su estado técnico actual, las causas de este estado y también en el horizonte futuro el cambio de este estado.

La información que alimenta los modelos propuestos en el proyecto, es fundamental en el proceso de diagnóstico. Datos recolectados sin ninguna rigurosidad, pueden producir resultados errados en las tareas del diagnóstico, o por otro lado, la redundancia de información puede hacer que el proceso sea lento. Por estas razones se concluye que los criterios para recolectar la información son el primer paso en el proceso de diagnóstico, porque de lo contrario , se pueden afectar significativamente las posteriores tareas de diagnóstico.

Los puntos de medición de vibraciones mecánicas, entre los propuestos por la norma ISO 2372, que más información aportan a las tareas de diagnóstico, son los ubicados en direcciones radiales sobre la carcasa de la bomba y sobre el rodamiento (lado bomba) del motor.

El método para definir valores límite para las distribuciones de los estimadores vibro-acústicos medidos en el sistema de bombeo experimental que produjo mejores resultados, es el método basado en el valor promedio del parámetro de diagnóstico antes del estado de avería.

En general, los estimadores vibro-acústicos no demostraron ser parámetros de diagnóstico muy confiables para emitir juicios sobre un estado técnico de avería causado por una obstrucción en la línea de succión del sistema de bombeo experimental. En particular, los estimadores que permiten evaluar el sistema con mayor acierto es la frecuencia de Rice calculados para la señal tomada de la carcasa de la bomba en la dirección radial, y la desviación estándar y el valor global de la vibración calculados a partir de la señal tomada en la dirección radial sobre el rodamiento (lado bomba) del motor. De acuerdo con los resultados del experimento pasivo, los estimadores vibro-acústicos menos pertinentes en el diagnóstico del sistema de bombeo experimental son los valores pico y el factor cresta.

El fenómeno de cavitación que se produce por la obstrucción en la línea de succión de la bomba, puede ser explicado con una confianza mayor al 99% por los parámetros de operación del sistema: caudal, cabeza de bomba y eficiencia, según lo demuestra el modelo regresivo propuesto; los parámetros vibro-acústicos no probaron ser representativos para la explicación del modelo.

Los parámetros de diagnóstico óptimos para la emisión de un pronóstico del estado técnico son el caudal, la eficiencia, el valor RMS y la frecuencia Rice de la medición en la bomba; sin embargo, el que presentó mejor desempeño en los pronósticos resultantes, es la eficiencia.

De los métodos de pronóstico tratados para el parámetro de diagnóstico: eficiencia, el método adaptativo de Brown-Mayer de segundo orden, fue el que arrojó mejores resultados de acuerdo a los criterios establecidos.

BIBLIOGRAFÍA

BENDAT, Julius. Engineering Applications of Correlation and Spectral Analysis. USA: 1980. 3era Ed. 437p. ISBN 0-47-157055-9

CHUGANI, Mahesh; SAMANT y CERNÁ. LabView Signal Processing. New York, USA: Prentice Hall PTR, 1998. 1a Ed. 634p. ISBN: 0-13-972449-4.

COLLACOTT, Ralph. Mechanical fault diagnosis and condition monitoring. New York, USA: Chapman and Hall, 1977. 44 p.

COLLIS, W. B., WHITE, P. R. Higher Order Spectra: the Bispectrum and Trispectrum. Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 12(3), 1998, 375p.

FRANZINI, Joseph B. y FINNEMORE E. John. Mecánica de fluidos con aplicaciones en ingeniería. Novena Edición. Editorial McGraw Hill. Madrid. España. 1999. 503p. ISBN 84-481-2474X.

GAYNOR, Patricia E y KIRKPATRICK Rickey C. Introduction to time-series modeling and forecasting in business and economics. McGraw-Hill. United States of America. 1994. 625p. ISBN 0-07-034913-4.

GUERRERO, B. Ricardo A. Desarrollo de un Procesador Computacional de Señales Aplicado al Diagnóstico Técnico. Universidad EAFIT. Proyecto de Grado. Departamento de Ingeniería Mecánica. Medellín. 2005. 199p.

GUSSOW, Milton. Fundamentos de Electricidad. Primera edición. Editorial McGraw Hill. México, D.F. México. 1991. 453p. ISBN 968-422-977-1

HERNANDEZ, Fidel , ATXA, Vicente. Diagnóstico de maquinarias rotativas aplicando técnicas clásicas y avanzadas de análisis de vibraciones: Resultados obtenidos. 2000. 11p

_____. Análisis de vibraciones para el diagnóstico aplicando procesamiento estadístico de orden superior. 2000. 6p

ISO 2372. Mechanical vibration in rotating machinery. Basis for specifying evaluation standards for rotating machines with operating speeds from 10 to 200 revolutions per second. 1974. 9p.

KARASSIK, Igor J, y otros. Manual de Bombas: Diseño, Aplicación, Especificaciones, Operación y Mantenimiento. McGraw-Hill. México. 1983. ISSN: 968-451-274-0.

KRYSANDER, Mattias. Design and analysis od diagnóstico systems utilizing structural methods. Linköping, Suecia. 2003.15 p.

MAKRIDAKIS, Spyros y WHEELWRIGHT, Steven C. Forecasting: Methods and applications. John Wiley & Sons. United States of America. 1978. 713p. ISBN 0-471-93770-3.

MATAIX, Claudio. Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas. Segunda Edición. Editorial Harla S.A. México D.F. México. 1982. 660p. ISBN 968-6034-29-3.

MCNAUGHTON, Kenneth J. Bombas: Selección, Uso y Mantenimiento. McGraw-Hill. México.1992. 373 p. ISSN: 9684220367.

MOTT, Robert L. Mecánica de fluidos aplicada. Cuarta Edición. Editorial Prentice Hall Hispanoamericana, S.A. México D.F. México. 1996. 580p. ISBN 968-880-542-4.

NATKE, H.G., y CEMPEL, C. Holistic dynamics and subsystem modelling: principles. International journal of systems sciences. Vol 30. Hannover, Alemania: University of Hannover, 1999. 283 - 286 p.

_____ y _____. Model - Aided Diagnosis of mechanical systems. Fundamentals, Detection, Localization, Assessment. Berlín, Alemania: Springer, 1997. 1, 5, 36 - 38, 41, 42, 56 - 61 p.

_____ y _____. Symptom observation matrix for monitoring and diagnosis. Journal of sound and vibration. Hannover, Alemania: University of Hannover, 2001. 597 - 661, 603, 609 - 613 p.

NEPA, Woodrow A. y URWIN, Robert J. Centrifugal Pump Failure Analysis. Editorial Cahners Publishing Corporation. Barrington, IL. Revista Plant Engineering. Volumen 47. Número 15. 1993. 3p. ISSN 0032082X.

PERSONAL, Técnico. American Pipe and Construction Int. Golpe de Ariete; Una discusión simplificada del fenómeno del golpe de ariete. Revista Acodal. Bogotá. 1966. 14 p. ISSN: 01200798.

PINEDA, Juan Manuel. Seminario: Eficiencia y ahorro de energía en sistemas de bombeo. Goulds Pumps. Hotel Poblado Plaza. Medellín, Colombia. Julio 28 de 2005.

PIÑEYRO, Juan J, KLEMPNOW, Andreas, LESCANO, Vicente. Análisis de señales: Aplicaciones en el área de las vibraciones mecánicas. Buenos Aires, Argentina: Universidad tecnológica nacional. 2002. 71p

POYNTON, James P. Metering Pumps: Selection and Application. Editorial Marcel Dekker. New York. 1983. 194p. ISBN 0824717597.

PROAKIS, John. Tratamiento digital de señales. Vigo, España: Prentice Hall, 1998,3ª Ed. 125p.ISBN 84-8322-000-9

SAAVEDRA, Pedro. Seminario internacional. Vibraciones y rotodinámica en equipo rotatorio. Universidad de Concepción. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería mecánica. Cali. 1997. 161p.

SAAVEDRA, Pedro. Análisis de vibraciones. Nivel II. Universidad de Concepción. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería mecánica. Concepción, Chile. 275p. 1998.

SALAZAR, M. Carlos A. Guía De Laboratorio Para La Simulación De Modos De Falla En Un Sistema De Bombeo De La Universidad Eafit. Universidad EAFIT. Proyecto de Grado. Departamento de Ingeniería Mecánica. Medellín. 2005. 189p.

TORRES, C. Gabriel J. y VALENCIA, V. Andrés F. Banco Experimental para la simulación de modos de falla en sistemas de bombeo. Universidad EAFIT. Proyecto de Grado. Departamento de Ingeniería Mecánica. Medellín. 2004. 135p.

TYLICKI, Henryk. Optymalizacja procesu prognozowania stanu technicznego pojazdów mechanicznych. Tesis doctoral. Techniczno Rolnicza. Bydgoszcz, 1997,

WYLIE, Benjamin y STREETER, Victor L. Fluid Transients in Systems. Editorial Prentice Hall. New Jersey. United States of America. 1993. 463p. ISBN 0-13-934423-3.

REFERENCIAS TOMADAS DE INTERNET

ASHCROFT. Conversion factors for units of pressure. Copyright Instrument Division, Dresser Industries, Inc. 1992. 2p. Disponible en: http://www.dresserinstruments.com/products/common_pi_pages/ASH-PI-4A.pdf. Visitado en Julio 28 de 2005.

DANFOSS. Ficha técnica: MBS 3000 pressure transmitter for industrial applications. 2002. 4p. Disponible en: <http://www.tranilamp.com/controlgear/danfoss-specs/MBS-3000-PDP20K202.pdf>. Visitado en Julio 14 de 2005.

ELSTER. The Kent Range of Bulk Meters. H4000 Woltmann cold water meters. Elster Metering Limited. Luton, Bedfordshire. 6p. Disponible en: http://www.thaimeters.co.th/Datasheet_files/water%20meter/%206961%20H4000%20Brochure%20AW.pdf. Visitado en Julio 14 de 2005.

EXTECH, Instruments. User's Guide: Digital Stroboscope Tachometer. Model 461830 and Model 461831. Version 2.2. 2003. 8p. Disponible en: http://www.extech.com/instrument/products/451_499/manuals/461830_831_UM.pdf. Visitado en Julio 14 de 2005.

FLOWSERVE, Flow control division. Installation, operation, maintenance instructions: Valtek Trooper control valves. 1998. 16p. Disponible en: http://www.honeywell.com.pl/pdf/automatyka_przemyslowa/zawory/IOM38.pdf. Visitado en Julio 14 de 2005.

FLUKE. Instruction sheet: AC current clamp. i200/i200s. Francia. 1998. 2p. Disponible en: http://www.tequipment.net/pdf/i200_S_InstructionSheet.pdf. Visitado en Julio 14 de 2005.

GOULDS, Pumps. Predictive and Preventative. Pump vibration and bearing analysis. 3p. Disponible en: http://www.gouldspumps.com/pom_0012.html. Visitado en Agosto 16 de 2005.

HÄRLE, Markus, y otros. Mapping the brain's orchestration during speech comprehension: task-specific facilitation of regional synchrony in neural networks. 2004. 11p. Disponible en: <http://www.biomedcentral.com/content/pdf/1471-2202-5-40.pdf>. Visitado en Octubre 10 de 2005.

I.Q, Instruments CC. Model 2212 V & 2212 IV Vibration Transmitter. Vibration Criterion Chart from VDI 2056. Disponible en: <http://www.iqinstruments.com/pdf/2212ivuser.pdf>. Visitado en Agosto 16 de 2005.

KISTLER. 8702B & 8704B K-SHEAR® ACCELEROMETER SERIES. 2p. Acceleration–AVP. Disponible en: [http://www.kistler.co.kr/tmp/File/000-239/\\$File/000-239e-08.02.pdf](http://www.kistler.co.kr/tmp/File/000-239/$File/000-239e-08.02.pdf). Visitado en Agosto 3 de 2005.

NATIONAL, Instruments. User Manual: DAQCard™-6062E. Multifunction I/O Device for PCMCIA. Part Number 370564A-01. 2002. 119p. Disponible en: <http://www.wtb.tue.nl/sel/SEL/National%20Instruments/National%20Instruments%206062E%20en.pdf>. Visitado en Julio 14 de 2005.

SIEMENS. Operating Instructions: Micromaster 440. 2005. 308 p. Disponible en: <http://support.automation.siemens.com/WW/llisapi.dll?func=cslib.csinfo&lang=en&objID=10804928&subtype=133300>. Visitado en Julio 13 de 2005.

_____ Instructions for Three-Phase Motors 1LA6, 1LA7/9, 1LP7/9, 1PP7/9, 1MA6/7, 1MF6/7, Frame Size 56 - 90L, 100 - 160L. 2003. 36p. Disponible en: <http://support.automation.siemens.com/-snm-0135109872-1116758784-0000032300-0000023174-1121358602-enm-WW/llisapi.dll?filter=1LA7&aktprim=0&foldersopen0=-74-73-72-71-2-3-&func=cslib.csinfo&lang=en&nodeid0=10803938&objaction=csbrowse&objid=10803938&siteid=cseus&subtype=133300>. Visitado en Julio 14 de 2005.

_____ Operating Instructions: SITRANS P - Transmitters for pressure and absolute pressure, ZD series. Primera edición. 2003. 166p. Disponible en: <http://support.automation.siemens.com/-snm-0135109872-1116758784-0000032300-0000023174-1121351628-enm-WW/llisapi.dll?aktprim=0&lang=en&referer=%2fWW%2fllisapi.dll?aktprim=0&func=cslib.csinfo&siteid=cseus&startNode=4000024&nodeid0=19266776&objaction=csopen>. Visitado en Julio 14 de 2005.

STERLING, Fluid Systems Colombia. Halberg Nowa. Manual de Instalación, Operación y Mantenimiento. 2004. 36p. Disponible en: <http://www.sterlingfluidsystems.com/art/download/product/FILE741.pdf>. Visitado en Julio 14 de 2005.

STERLING, Fluid Systems Group. Halberg Nowa. Bombas Centrífugas de Carcasa Espiral. 2003. 8p. Disponible en: <http://www.sterlingfluidsystems.com/art/download/product/FILE738.pdf>. Visitado en Julio 14 de 2005.

UPC. Diagrama de Moody. Escuela superior de agricultura de Barcelona. 1 p. Disponible en: <http://mie.esab.upc.es/df/fluids/moody.htm>. Visitado en Julio 27 de 2005.